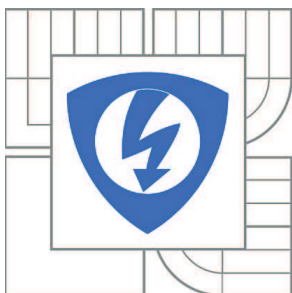


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## SIMULÁTOR FUNKCE FM-CW DÁLKOMĚRU

SIMULATOR OF THE FM-CW RANGEFINDER FUNCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

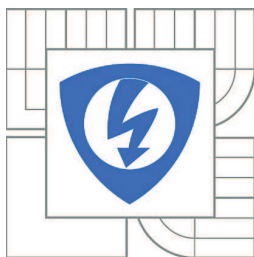
Bc. MARTIN BAČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV ŘÍČNÝ, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Martin Bačík

**ID:** 106360

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

### Simulátor funkce FM-CW dálkoměru

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte simulátor funkce FM-CW dálkoměru ve formě laboratorního přípravku. Diplomová práce má obsahovat:

1. blokové schéma simulátoru
2. obvodový návrh modulátoru a demodulátoru simulátoru
3. úplné konstrukční podklady pro realizaci simulátoru (schéma, výkresy plošného spoje a rozložení součástek).

Realizace není požadována.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ŘÍČNÝ, V. Maximum available accuracy of FM-CW radars. Radioengineering. 2009, vol.18, no.4, p. 350 - 353.
- [2] M. I. SKOLNIK, M. I. Introduction to Radar Systems, 3rd Ed. McGraw-Hill, 2005.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 18.5.2012

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Václav Říčný, CSc.

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
Předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto práca popisuje problematiku návrhu simulátoru FM-CW diaľkomeru. Výber optimálnej metódy realizácie. Práca informuje o základných vlastnostiach kontinuálne pracujúcich radarov. Práca zahrňuje analýzu chybovosti reálneho diaľkomeru a numerický odhad maximálnej chyby celého reálneho zariadenia. Obsahuje detailné blokové schéma simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru a počítačovú simuláciu funkcie generátora kmitočtovo modulovaného signálu, demodulátoru. Ďalej práca zahŕňa úplné konštrukčné podklady pre realizáciu prípravku a základné funkčné overenie

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Elektromagnetické vlnenie, FM-CW diaľkomer, kontinuálne pracujúce diaľkomery, antikolízny radar, FPGA, kmitočtový modulátor, kmitočtový demodulátor, softwarové rádio

## **ABSTRACT**

This thesis describes design of Simulator FM-CW range finders. It is choosing the optimal method of realization and inform about basic properties of continuous working radar. The work includes an analysis of errors in real rangefinder and a numerical estimate of the maximum error in real devices. Contains detailed block diagram of simulator FM-CW range-finder and computer simulation of function generator frequency modulated signal, demodulator. Further work includes the complete construction documents for the preparation and implementation of basic functional verification

## **KEYWORDS**

Electromagnetic waves, FM-CW rangefinder, continuously operating rangefinder, anti-collision radar, FPGA, frequency modulator, frequency demodulator, software radio

BAČÍK, M. *Simulátor funkce FM-CW dálkoměru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 49 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Říčný, CSc.

## Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na téma Simulátor funkcie FM-CW diaľkomeru som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, a hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 14. 5. 2012

.....  
podpis autora

## Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce prof. Ing. Václavu Říčnému, CSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa 14. 5. 2012

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>7</b>
<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Kontinuálne pracujúce sústavy</b>	<b>9</b>
1.1 Fázové diaľkomerné sústavy .....	9
1.2 Diaľkomery s kmitočtovou moduláciou .....	10
1.2.1 Diaľkomery s kmitočtovou moduláciou s vyhodnocovaním záznejov prijímaného a vysielaného signálu .....	10
1.2.2 Diaľkomery s dvojitou kmitočtovou moduláciou .....	10
1.2.3 Diaľkomery s kmitočtovou moduláciou s vyhodnocovaním kmitočtového zdvihu .....	10
<b>2 Základné princípy a funkcie reálneho Radaru</b>	<b>11</b>
2.1 Blokové schéma .....	12
2.2 Faktory ovplyvňujúce maximálnu dostupnú presnosť FM-CW radaru ..	13
2.3 Odhad najväčšej hodnoty celkovej relatívnej chyby FM-CW Radaru ...	14
2.3.1 Numerický príklad .....	15
<b>3 Možnosti hardwarovej simulácie</b>	<b>16</b>
3.1 Návrh simulátoru s integrovaným obvodom FPGA .....	16
3.2 Návrh simulátoru pomocou oneskorovacích členov .....	17
3.3 Zvolenie metódy realizácie .....	18
<b>4 Blokové schéma simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru</b>	<b>19</b>
4.1 Blokové schéma .....	19
4.2 Blok generátor kmitočtovo modulovaného signálu .....	21
4.2.1 Realizácia bloku generátoru kmitočtovo modulovaného signálu .....	21
4.2.2 Voľba pracovného kmitočtu prípravku .....	23
4.3 Blok kmitočtového demodulátoru .....	24
4.3.1 Realizácia bloku kmitočtového demodulátoru .....	25
4.4 Blok riadiaca jednotka .....	29
4.5 Komunikácia s osobným počítačom .....	31
<b>5 Technické prevedenie zariadenia</b>	<b>32</b>

5.1	Vnútorne schéma obvodu .....	33
5.1.1	Implementácia procesoru do obvodu FPGA.....	34
5.1.2	Nastavenie priamej číslicovej syntézy .....	
5.1.3	Nastavenie filtru FIR .....	
5.2	Určenie nepresnosti merania.....	36
<b>6</b>	<b>Riadiaci program</b>	<b>38</b>
6.1	Modul Pico_beginner.....	38
6.2	Modul Stav.....	40
6.3	Modul Timing .....	42
6.4	Modul Modulace.....	42
6.5	Modul Demodulator.....	43
6.6	Modul Display_Driver.....	43
<b>7</b>	<b>Základné funkčné overenie</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Záver</b>	<b>48</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>49</b>



# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Ideové znázornenie diaľkomeru .....	9
Obr. 2.1 Blokové schéma FM-CW radaru [1] .....	12
Obr. 3.1: Ideové blokové schéma diaľkomeru.....	16
Obr. 3.2: Blokové schéma simulátoru s integrovaným obvodom FPGA .....	17
Obr. 3.3: Blokové schéma simulátoru s oneskorovacími členmi .....	18
Obr. 4.1.: Blokové schéma Simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru .....	20
Obr. 4.2.: Zapojenie bloku frekvenčného modulátoru.....	21
Obr. 4.3.: Schéma bloku frekvenčného modulátoru .....	22
Obr. 4.4.: Vstupy a výstupy bloku frekvenčného modulátoru signál .....	22
Obr. 4.5.: Priebeh signálu fázového inkrementu .....	23
Obr. 4.6.: Priebeh výstupného frekvenčne modulovaného signálu .....	23
Obr. 4.7.: Zapojenie bloku frekvenčného demodulátoru .....	25
Obr. 4.8.: Simulované schéma bloku frekvenčného demodulátoru.....	26
Obr. 4.9.: Vstupy a výstupy bloku frekvenčného modulátoru signál .....	26
Obr. 4.10.: Priebeh signálu Q a I .....	27
Obr. 4.11.: Priebeh signálu Q a I po filtrácii.....	28
Obr. 4.12.: Výstupný kmitočtovo demodulovaný signál .....	28
Obr. 4.13.: Stavový automat .....	29
Obr. 4.14.: Vstupy a výstupy bloku frekvenčného modulátoru signál .....	30
Obr. 4.15.: Rozdelenie jedného slova UART .....	30
Obr. 5.1.: Vývojová doska Spartan-3 Starter Kit Board .....	32
Obr. 5.2.: Vývojová doska graficky Spartan-3 Starter Kit Board [7] .....	32
Obr. 5.3.: Vnútorne schéma zapojenia FPGA .....	33
Obr. 5.4.: Základné stavebné bloky DDS [6] .....	34
Obr. 5.5.: FDAtool .....	36
Obr. 6.1: Schéma modulov v hlavnom programe .....	38
Obr. 7.1.: Časový priebeh kmitočtovo modulovaného signálu.....	45
Obr. 7.2.: Časový priebeh kmitočtovo demodulovaného signálu.....	45
Obr. 7.3.: Časový priebehy signálov v modulátore .....	46
Obr. 7.4 Časový priebehy signálov v demodulátore.....	47

# ÚVOD

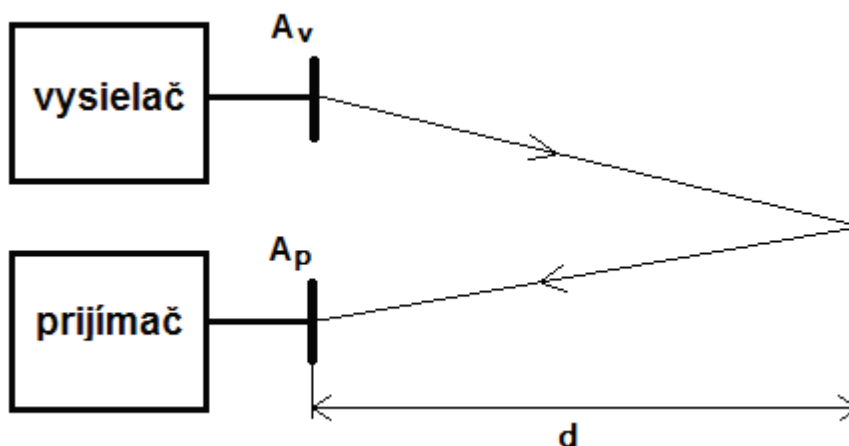
Bezdotykové meranie vzdialenosti sa v dnešnej dobe považuje za samozrejmosť. Využíva sa v mnohých oblastiach priemyslu, stavitel'stva, strojárstva alebo dopravy. Pri určovaní odstupu motorových vozidiel, zistení vzájomnej rýchlosti dvoch objektov a mnohé iné. V súčasnej dobe existuje viac spôsobov pre nespojité a spojité meranie vzdialenosti.

Diplomová práca sa bližšie zaoberá spojitým meraním vzdialenosti pomocou kmitočtovo modulovaného spojitého vlnenia pomocou tzv. FM-CW (Frequency Modulated – Continuous Wave) diaľkometerov (radarov). V praxi sa táto metóda využíva napríklad v antikolíznych systémoch u automobilov. Vďaka princípu tejto metódy je možné okrem vzdialenosti vyhodnocovať aj rýchlosť pohybujúceho sa telesa.

Cieľom práce bolo popísať problematiku návrhu simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru pre laboratórne účely. Zoznamuje so základnými princípmi a funkciami kontinuálne pracujúcich diaľkometerov a rozbor dosiahnuteľnej presnosti merania. Diplomová práca ďalej pojednáva o možnostiach hardwarovej simulácie a jeho funkcie pre experimentálne účely v podobe laboratórneho prípravku. Po zvážení všetkých možností realizácie je vypracované detailné blokové schéma. Pri návrhu jednotlivých blokov boli urobené simulácie pre základné overenie činnosti. Práca zahŕňa úplné konštrukčné podklady pre vypracovanie laboratórneho prípravku.

# 1 KONTINUÁLNE PRACUJÚCE SÚSTAVY

Sústavy, v ktorých sa vzdialenosť vyhodnocuje z časového posunutia spojitého signálu. Vplyvom šírenia elektromagnetického poľa v priestore medzi prijímacou a vysielačou anténou po dráhe  $2d$  sa v závislosti na meranej vzdialenosti  $d$  mení amplitúda a okamžitá fáza prijímaného signálu. Podľa [2] pre kmitočtovo modulovaný signál platí, že v závislosti na časovom oneskorení  $T_d$  a teda aj na meranej vzdialenosti  $d$  sa mení okamžitý kmitočet  $f(t)$  prijímaného signálu



Obr. 1.1 Ideové znázornenie diaľkomeru

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} \quad (1.1)$$

Zmenu amplitúdy prijímaného signálu v závislosti na meranej vzdialenosti nie je možné použiť, pretože jej veľkosť významne ovplyvňujú aj iné faktory (vlastnosti prostredia a iné). Pre meranie výšky  $d$  je možné využiť zmenu fázy alebo zmenu okamžitého kmitočtu prijímaného signálu. Podľa toho, ktorej zmeny charakteristických vlastností prijímaného signálu je využité, môžeme najpoužívanejšie diaľkomery rozdeliť do niekoľkých skupín.

## 1.1 Fázové diaľkomerné sústavy

Fázové diaľkomery je oproti impulzným možno použiť aj pre meranie malých výšok, ale zabezpečenie jednoznačnosti určenia meranej veličiny značne komplikuje jeho technické riešenie.

## 1.2 Dialkomery s kmitočtovou moduláciou

### 1.2.1 Dialkomery s kmitočtovou moduláciou s vyhodnocovaním záznejov prijímaného a vysielaného signálu

V sústave sa privádza vysielaný a časovo oneskorený prijímaný signál na detektor a meria sa kmitočet vyniknutých záznejov týchto signálov daný vzťahom [2]

$$f_z = \frac{8d}{c} \cdot \Delta\omega_v F \quad (1.2)$$

Táto sústava má však stále systematickú chybu merania výšky [2]

$$d_{ch} = \frac{c}{8\Delta f_v}, \quad (1.3)$$

ktorá znemožňuje meranie malých výšok. Pre zmenšenie chyby je nutné použiť veľký kmitočtový zdvih vysielaného kmitočtového signálu  $\Delta f_v$ .

### 1.2.2 Dialkomery s dvojitou kmitočtovou moduláciou

Táto sústava už nemá stále systematickú chybu, ale je značne zložitejšia. Navyše je maximálny dosah tejto sústavy obmedzený [2]

$$d_m \leq \frac{c}{4F_2}. \quad (1.4)$$

### 1.2.3 Dialkomery s kmitočtovou moduláciou s vyhodnocovaním kmitočtového zdvihu

Podstata sústavy je v tom, že časovo oneskorený prijímaný kmitočtovo modulovaný signál sa zmiešava s vysielaným kmitočtovo modulovaným signálom. Je možné dokázať, že kmitočtový zdvih  $\Delta f$  medzifrekvenčného signálu je úmerný časovému oneskoreniu  $T_d$  a tým aj meranej vzdialenosti. S rastúcou vzdialenosťou sa vyhodnocovaný kmitočtový zdvih spojitne zväčšuje. Viac v nasledujúcej kapitole.

## 2 ZÁKLADNÉ PRINCIPY A FUNKCIE REÁLNEHO RADARU

Dial'komer s kmitočtovo modulovanou kontinuálnou vlnou je často používaný v aplikáciách pre spojité meranie vzdialenosti a vzájomnej rýchlosti dvoch objektov. Využíva sa napríklad v antikolíznych radarových systémoch v automobiloch. Tento radar umožňuje meranie vzdialenosti  $d$  medzi objektmi a prípadne aj relatívnej rýchlosti.

Zjednodušené funkčné schéma je znázornené na obr. 3.1. Kmitočtovo modulovaný signál  $s_t(t)$  je prenášaný prostredníctvom antény  $A_d$ . Odrazený a oneskorený kmitočtovo modulovaný signál  $s_r(t)$  je prijatý a zmiešaný v **MX2** s prenášaným a kmitočtovo konvertovaným signálom  $s_0(t)$  (jeho centrálny kmitičet je  $f_{i0} - f_0$ ). Zmiešavač **MX1** s nízkofrekvenčným oscilátorom  $O_f$  vykonáva kmitočtový posun. Časovo oneskorený  $t_d$  je úmerný vzdialenosti  $d$  od objektu [1]

$$t_d = \frac{2d}{c}, \quad (2.1)$$

kde  $c$  je rýchlosť šírenia elektromagnetických vln ( $c = 3.108 \text{ m/s}$ ).

Matematické vyjadrenie kmitočtu okamžitého signálu  $f_{MX2}(t)$  pri kmitočte demodulátoru **FMD**, ktoré platí len pre sínusovo kmitočtovo modulovaný vysielací oscilátor [1]

$$f_{MX2}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} [\Phi_{MX2}(t)] = f_0 \pm f_D - 2\Delta f_{i0} \cdot \sin \Omega \left( t - \frac{t_d}{2} \right), \quad (2.2)$$

kde  $\Omega$  je uhlový kmitočet modulácie [rad/s].

$$\Omega = 2\pi F, \quad (2.3)$$

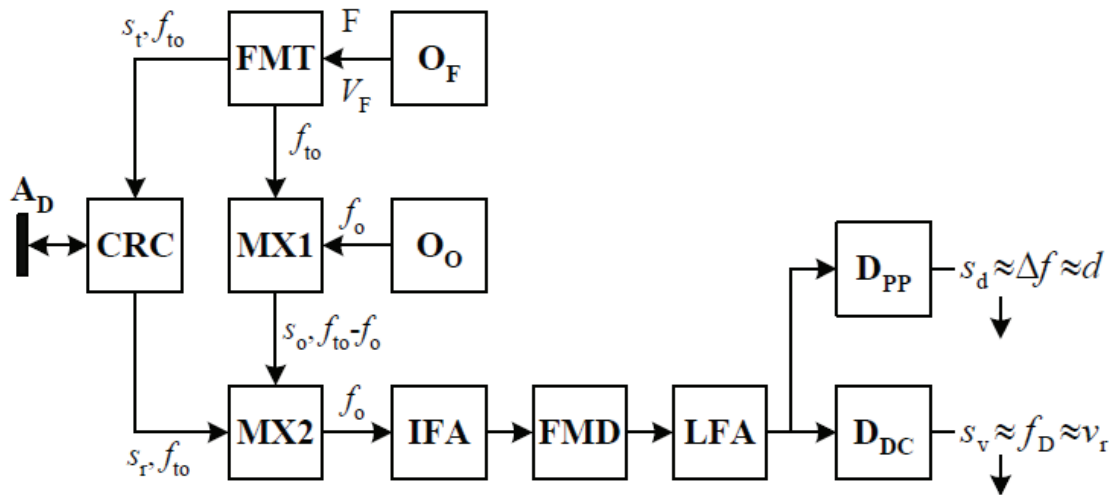
$F$  je kmitočet nízkofrekvenčného oscilátoru  $O_f$  [Hz] a  $f_D$  je Dopplerov kmitočet [Hz]. Pre ktorý platí [1]

$$f_D = f_{i0} \cdot \frac{2v_r}{c}, \quad (2.4)$$

z toho vyplýva

$$v_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{f_D}{f_{i0}}. \quad (2.5)$$

## 2.1 Blokové schéma



Obr. 2.1 Blokové schéma FM-CW radaru [1]

<b>AD</b>	smerová anténa,
<b>IFA</b>	IF selektívny zosilňovač,
<b>CRC</b>	cirkulátor,
<b>FMD</b>	kmítotový demodulátor,
<b>FMT</b>	kmítotovo modulovaný vysielateľ,
<b>LFA</b>	LF zosilňovač,
<b>MX1, MX2</b>	signálové zmiešavače,
<b>D<sub>pp</sub></b>	špičkový detektor,
<b>O<sub>F</sub></b>	oscilátor,
<b>D<sub>DC</sub></b>	detektor jednosmernej zložky,
<b>O<sub>o</sub></b>	stredný oscilátor.

Amplitúda AC zložky kmítotu demodulovaného signálu je úmerná kmítotovému zdvihu  $\Delta f$ , a preto je priamo úmerná meranej vzdialenosti  $d$  [1].

$$d = \frac{\Delta f \cdot c}{4\pi \cdot F \cdot \Delta f_{t0}}, \quad (2.6)$$

kde  $\Delta f_{t0}$  je odchýlka kmítotu vyslaného kmítotovo modulovaného signálu  $s_{t0}(t)$ .

Centrálny kmítot z IF  $s_0(t)$  pred kmítotový demodulátorom **FMD** musí byť znížená na dosiahnutie dostatočnej presnosti kmítotovej demodulácie. DC zložka demodulovaného signálu na výstupe FMD demodulátoru sa líši lineárne s Dopplerovým kmítotom  $f_D$ , a preto je úmerná relatívnej rýchlosti  $v_r$  (viz. (2.5)).

Existuje mnoho ďalších pokročilých konfigurácií FM-CW radaru. Ich popis je ale nad rámec tohto projektu.

## 2.2 Faktory ovplyvňujúce maximálnu dostupnú presnosť FM-CW radaru

Medzi hlavné faktory podľa [1], ktoré ovplyvňujú maximálnu dostupnú presnosťou merania vzdialenosti patria chyby spôsobené jednotlivými funkčnými blokmi hlavne na vstupnej časti radaru. Chyby FM-CW radaru (obr. 3.1) rozdeľujeme na:

### Systematické chyby:

Systematické chyby sú chyby, ktoré pri opakovanom meraní rovnakej veličiny zostávajú rovnaké, alebo sa menia známym spôsobom. Pokiaľ sú tieto chyby zistiteľné presným meraním je ich možné redukovať úpravou zapojenia, alebo zmenou algoritmu vo výpočtovej jednotke. Systematické chyby radaru sú:

- časové oneskorenie  $\Delta t_{CR}$  v priečnom ramene (**MX1**) v štruktúre FM-CW radaru,
- nesprávnosť použitých aproximácií  $\alpha \cong \alpha$ .

### Náhodné chyby:

Vplyv náhodných chýb na meria vzdialenosti  $d$  je nekorelovaný. Tento predpoklad nemusí byť vždy presný. Napríklad, zmeny spôsobené zmenami teploty by mali byť vzájomne závislé:

- kmitočtová nestabilita ( $\Delta F/F$ ) oscilátoru **O<sub>F</sub>**,
- zmena napätia ( $\Delta V_F/V_F$ ) oscilátoru **O<sub>F</sub>**,
- nelinearita strmosti kmitočtovej modulačnej charakteristiky vo vysieláči **FMT**,
- nelinearita strmosti kmitočtovej demodulačnej charakteristiky vo kmitočtovom demodulátore **FMD**,
- variácia ( $\Delta G_A/G_A$ ) zo zisku zosilňovača **LFA**,
- variácie ( $\Delta K_{DPP}/K_{DPP}$ ) prevodu **D<sub>PP</sub>**,
- zmeny ( $\Delta c/c$ ) rýchlosti šírenia elektromagnetických vln v rôznych prostrediach.

## 2.3 Odhad najväčšej hodnoty celkovej relatívnej chyby FM-CW Radaru

Odhad [1] platí pre špičkovú hodnotu výstupného  $s_d$  signálu, ktorý je úmerný meranej vzdialenosti  $d$

$$\begin{aligned} s_d &= V_{\text{dem}} \cdot G_A \cdot K_{\text{DPP}} = S_{\text{FD}} \cdot \Delta f \cdot G_A \cdot K_{\text{DPP}} = \\ S_{\text{FD}} \cdot G_A \cdot K_{\text{DPP}} \cdot \Delta f_{t0} \cdot \Omega \cdot (t_d - \Delta t_{\text{CR}}) &= K_{\text{sum}} \cdot d \end{aligned} \quad (2.7)$$

kde  $S_{\text{FD}}$  je koeficient strmosti kmitočtovej charakteristiky kmitočtového demodulátoru **FMD** [V/Hz] -  $U_{\text{dem}} = S_{\text{FD}} \cdot \Delta f$

$G_A$       zosilnenie nízkofrekvenčného zosilňovača,  
 $K_{\text{DPP}}$     činiteľ prenosu detektoru špičkovej hodnoty  $D_{\text{PP}}$ ,  
 $K_{\text{sum}}$     celkový činiteľ prenosu radaru .

Výstupný signál časovo kompenzovaného radaru môže byť vyjadrený z rovníc (2.7) a (2.6) a za predpokladu, že  $\Delta t_{\text{sum}} \rightarrow 0$  a  $\Delta f_{v0} = S_{\text{FD}} \cdot V_m$

$$\begin{aligned} s_d &= 4\pi \frac{S_{\text{FD}} \cdot G_A \cdot K_{\text{DPP}} \cdot F \cdot \Delta f_{t0} \cdot d}{c} = \\ &= 4\pi \frac{S_{\text{FD}} \cdot G_A \cdot K_{\text{DPP}} \cdot F \cdot S_{\text{FM}} \cdot V_h \cdot d}{c} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Táto rovnica platí pre konfiguráciu podľa na obr. 3.1 a v prípade nenulovej hodnoty  $\Delta t_{\text{CR}}$  sa kompenzuje v priečnom ramene ( $\Delta t_{\text{CRsum}} \rightarrow 0$ ). Jednotlivé zložky vo vzorci 2.8 nie sú konštanty. Môžu byť ovplyvňované náhodnými variáciami rôznych faktorov, ktoré môžu spôsobiť chyby merania. Tieto chyby sú pre tento rozbor považované za nekorelované. Avšak, distribučné funkcie jednotlivých chýb sú neznáme. Preto maximálna hodnota celkovej relatívnej chyby  $|\delta_{\text{tr}}|$  z nameranej vzdialenosti  $d$  môže byť vyjadrená ako súčet predpokladaných maxim všetkých chýb

$$|\delta_{\text{tr}}| = |\delta_a| + |\delta_{\text{FD}}| + |\delta_A| + |\delta_{\text{DPP}}| + |\delta_F| + |\delta_{\text{FM}}| + |\delta_{V_h}| + |\delta_c|. \quad (2.9)$$

Čiastkové maximálne hodnoty chýb z (2.9) môžu byť vyjadrené z týchto výrazov:



$$\delta_a = \frac{|\alpha_{\max}|^3}{6\sin\alpha_{\max}}, \quad (2.10.a)$$

$$\delta_{\text{FD}} = \frac{\Delta S_{\text{FD}}}{S_{\text{FD}}}, \quad (2.10.e)$$

$$\delta_A = \frac{\Delta G_A}{G_A}, \quad (2.10.b)$$

$$\delta_{\text{P-P}} = \frac{\Delta K_{\text{DPP}}}{K_{\text{DPP}}}, \quad (2.10.f)$$

$$\delta_F = \frac{\Delta F}{F}, \quad (2.10.c)$$

$$\delta_{\text{FM}} = \frac{\Delta S_{\text{FM}}}{S_{\text{FM}}}, \quad (2.10.g)$$

$$\delta_{\text{Vh}} = \frac{\Delta V_h}{V_h}, \quad (2.10.d)$$

$$\delta_c = \frac{\Delta c}{c}. \quad (2.10.h)$$

### 2.3.1 Numerický príklad

Výpočet maximálnej hodnoty celkovej relatívnej chyby  $|\delta_{\text{tr}}|$  z meranej vzdialenosti  $d$  môže byť realizovaný na základe predbežného odhadu hodnôt maximálnych chýb jednotlivých funkčných blokov. Predpokladá sa, že najväčšia chyba, ktorú možno dosiahnuť v praktickej technickej realizácii FM-CW radaru je [1]

$$|\delta_a| = 69 \cdot 10^{-3}, |\delta_F| \leq 10^{-4}, |\delta_{\text{Vh}}| \leq 10^{-2}, |\delta_A| \leq 2 \cdot 10^{-2}, |\delta_{\text{DPP}}| \leq 2 \cdot 10^{-2}, |\delta_c| \leq 10^{-4}.$$

Hodnoty chýb kmitočtového modulátoru  $|\delta_{\text{FM}}|$  a demodulátoru  $|\delta_{\text{FD}}|$  závisí na technickom návrhu zapojenia týchto blokov. V tomto prípade je uvažované zapojenie s kapacitnou diódou a predpokladané hodnoty chýb sú

$$|\delta_{\text{FM}}| = |\delta_{\text{FD}}| = 10^{-2}.$$

Po dosadení do vzťahu (3.4) platí pre maximálnu hodnotu celkovej relatívnej chyby  $|\delta_{\text{tr}}|$  meranej vzdialenosti  $d$  (súčet predpokladaných maxima zo všetkých chýb)

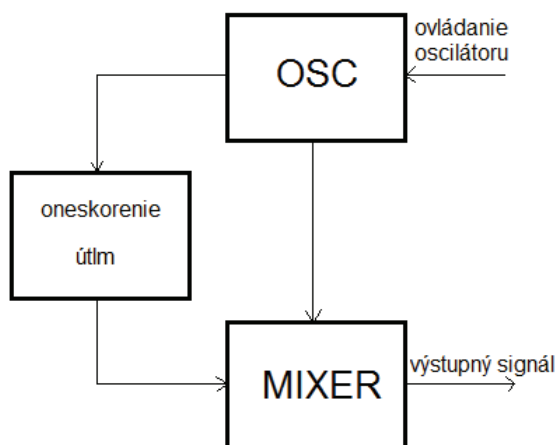
$$|\delta_{\text{tr}}| = (0,69 \cdot 10^{-3}) + (10^{-2}) + (2 \cdot 10^{-2}) + (2 \cdot 10^{-2}) + (10^{-4}) + (10^{-2}) + (10^{-2}) + (10^{-4}) = 0,079 = 7,9\%$$

Táto vypočítaná hodnota predstavuje len veľmi približný odhad maximálnej hodnoty celkovej chyby merania vzdialenosti.

### 3 MOŽNOSTI HARDWAROVEJ SIMULÁCIE

Úlohou projektu je vytvorenie vhodného hardwarového simulátoru (laboratórneho prípravku). Simulátor má za úlohu overiť základné princípy a funkciu FM-CW diaľkomeru. Z toho vyplývajú základné požiadavky na schopnosti prípravku:

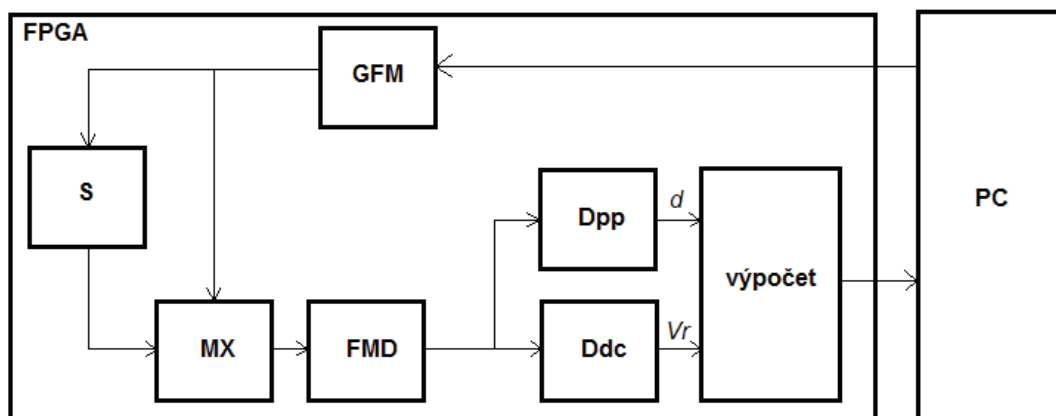
- možnosť zmeny kmitočtu modulačného a nosného signálu,
- možnosť zmeny amplitúdy vstupného signálu,
- zavedenie oneskorenia prijímaného signálu,
- zmena útlmu prijímaného signálu.



Obr. 3.1: Ideové blokové schéma diaľkomeru

#### 3.1 Návrh simulátoru s integrovaným obvodom FPGA

Jedna z možností návrhu simulátoru je použitie integrovaného obvodu FPGA. Základné blokové schéma je zobrazené na obr. 4.2. Kmitočtovo modulovaný signál je vytvorený digitálne v FPGA. Tento signál je následne rozdelený do dvoch vetiev. V bloku simulácie prostredia **S** je vstupný kmitočtovo modulovaný signál oneskorený a privedený na zmiešavač **MX**, kde je zmiešaný s pôvodným signálom. Po demodulácii sa signál ďalej spracováva.



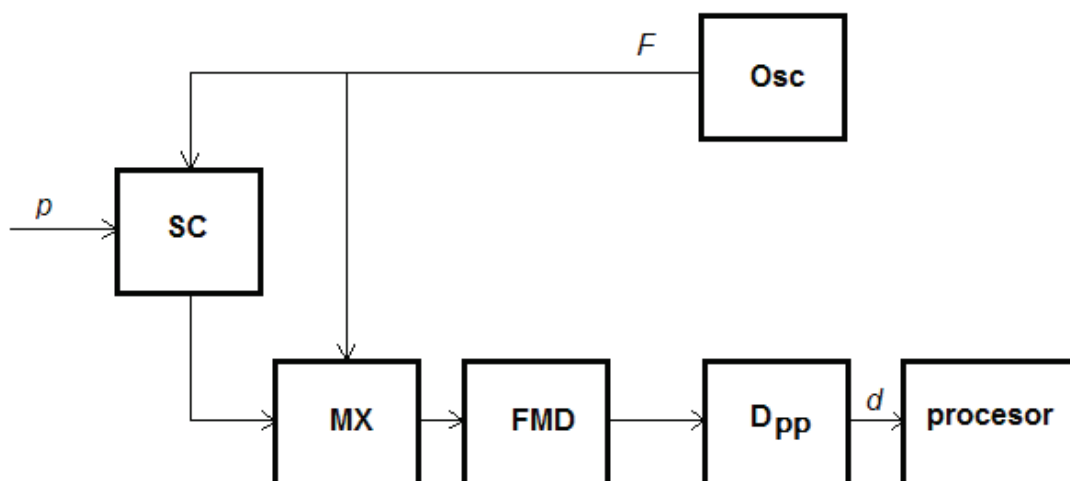
<b>GFM</b>	generátor kmitočtovo modulovaného signálu,
<b>S</b>	oneskorovací člen,
<b>MX</b>	kmitočtový zmiešavač,
<b>FMD</b>	kmitočtový demodulátor,
<b>D<sub>pp</sub></b>	špičkový detektor,
<b>D<sub>dc</sub></b>	jednosmerný detektor.

Obr. 3.2: Blokové schéma simulátoru s integrovaným obvodom FPGA

Uvedené zapojenie prináša možnosť meniť spojitú veľkosť oneskorenia signálu v oneskorovacom člene. Z toho vyplýva, že tento koncept je schopný okrem simulácie merania vzdialenosti, simulovať aj vzájomnú rýchlosť radaru a meraného objektu.

## 3.2 Návrh simulátoru pomocou oneskorovacích členov

Ďalšia možnosť pri návrhu simulátoru je využitie analógových oneskorovacích členov. Základné blokové schéma je zobrazené na obr. 4.3. Kmitočtovo modulovaný signál z oscilátoru je rozdelený do dvoch vetiev. V bloku **SC** je možné signál oneskoriť pomocou skupiny analógových oneskorovacích členov. Pomocou prepínačov **p** zvolíme žiadané oneskorenie. Oneskorený signál je privedený na zmiešavač **MX**, kde je zmiešaný s pôvodným signálom a následne demodulovaný v **FMD**.



<b>Osc</b>	zdroj kmitočtovo modulovaného signálu,
<b>SC</b>	oneskorovacie členy,
<b>MX</b>	kmitočtový zmiešavač,
<b>FMD</b>	kmitočtový demodulátor,
<b>D<sub>pp</sub></b>	špičkový detektor.

Obr. 3.3: Blokové schéma simulátoru s oneskorovacími členmi

Koncept je technicky pomerne jednoduchý a dôvernejšie simuluje reálny diaľkomer. Nevýhodou je, že odpadá možnosť simulácie vzájomnej rýchlosti radaru a meraného objektu

### 3.3 Zvolenie metódy realizácie

Cieľom predchádzajúceho textu bolo preštudovať základné princípy a funkciu kontinuálne pracujúcich diaľkomerov. V texte je uvedený rozbor vzniku možných chýb a odhad najväčšej relatívnej chyby presnosti merania. Po zvážení možností hardwarovej simulácie bude práca pokračovať návrhu Simulátoru s integrovaným obvodom FPGA. Dôvodom výberu tejto metódy je zaujímavejšie technické prevedenie a s tým spojená možnosť vývoja možností prípravku.

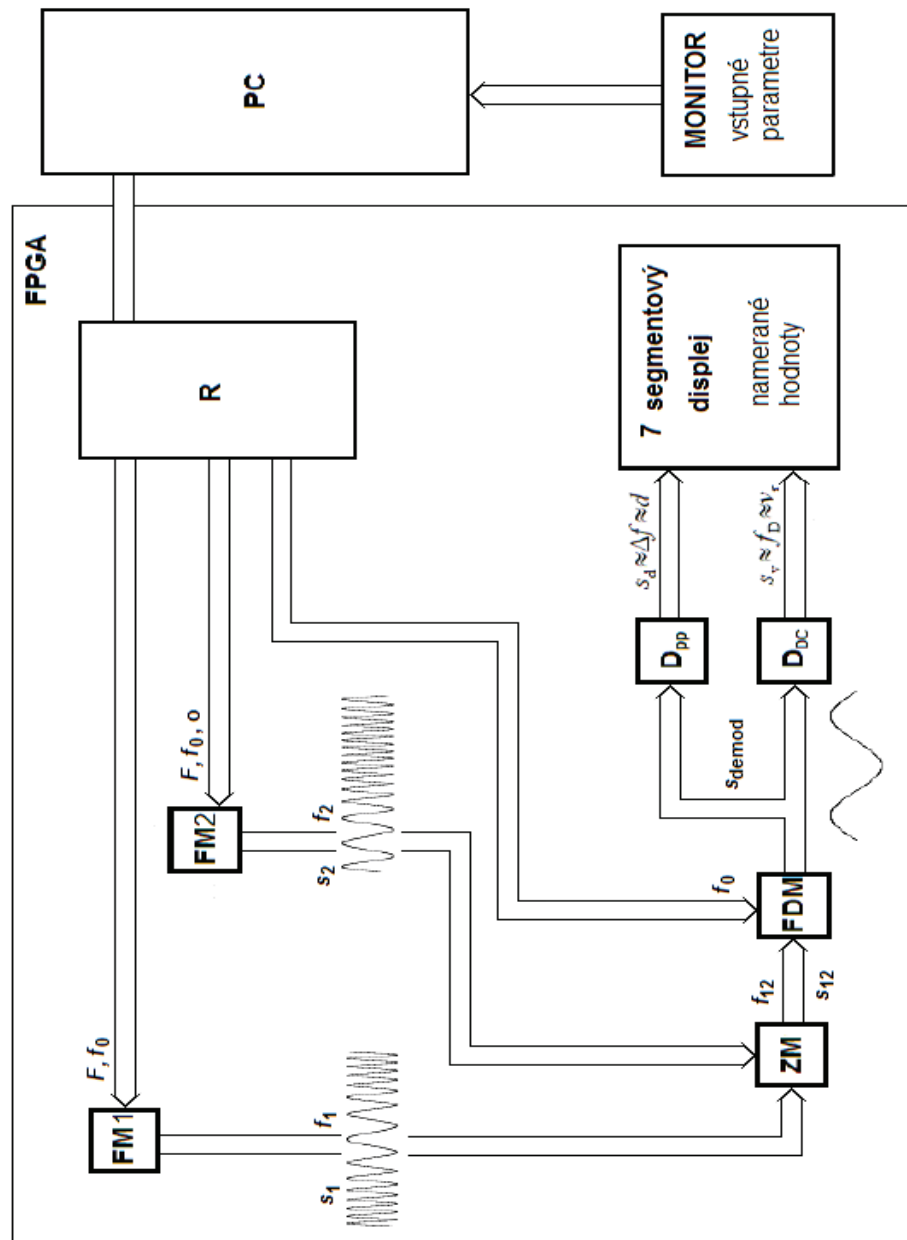
## 4 BLOKOVÉ SCHÉMA SIMULÁTORU FUNKCIE FM-CW DIALKOMERU

Simulátor FM-CW dialkomeru realizovaný pomocou obvodu FPGA zaraďujeme do riešenia pomocou softwarovo definovaného rádia. Softwarovo definované rádio je rádiový systém, v ktorom sa rozhodujúca časť spracovávania signálu realizuje softwarovo programovateľnými obvodmi. Vďaka tomu je možné jednoduchou zmenou softwaru používať rôzne kmitočtové pásma a komunikačné protokoly.

### 4.1 Blokové schéma

Z blokovej schémy Simulátoru funkcie FM-CW dialkomeru, ktorá je zobrazená na obrázku 4.1. je zrejmé, že obsahuje užívateľské rozhranie, ktoré reprezentuje osobný počítač s vhodným softwarom a samotný prípravok.

Prípravok je realizovaný na vývojovej doske s obvodom FPGA. Užívateľ zadá vstupne parametre: kmitočet nosného signálu, modulačný kmitočet, veľkosť oneskorenia signálu ( nahradzuje vzdialenosť od meraného objektu ). Z osobného počítača sú vstupné údaje poslané pomocou sériovej linky UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) do riadiacej jednotky **R**. V riadiacej jednotke je vstupné slovo po prijatí rozdelené na menšie slová, ktoré sú priradené ostatným blokom. Vstupom generátoru kmitočtovo modulovaného signálu **FM1** je veľkosť kmitočtu nosného signálu  $f_0$  a modulačný kmitočet  $F$ . Druhý generátor kmitočtovo modulovaného signálu **FM2** slúži na vytvorenie oneskoreného signálu. Zavedenie generátora **FM2** viedlo k možnosti zmeny oneskorenia signálu počas procesu merania, čo je prvoradé pri simulácii rýchlosti. Na jeho vstupe je rovnako kmitočet nosného signálu  $f_0$ , modulačný kmitočet  $F$  a veľkosť oneskorenia generovaného signálu. Priamy signál  $s_1$  okamžitým kmitočtom  $f_1$  je zmiešaný s časovo a fázovo posunutým signálom  $s_2$  v signálovom zmiešavači **ZM**. Výstupný signál  $s_{12}$  s okamžitým kmitočtom  $f_{12}$  je privedený na vstup kmitočtového demodulátora. Po demodulácii je detekovaný kmitočtový zdvih  $\Delta f$  alebo veľkosť stejnosemernej zložky signálu, v závislosti na zvolenom režime zariadenia. V riadiacej jednotke **R** sa nachádza jednoduchý stavový automat, ktorý je ovládaný pomocou tlačidiel. Pri zapnutom režime si užívateľ zvolí z možnosti merania vzdialenosti alebo vzájomnej rýchlosti. Namerané hodnoty sú odosielane na 7 segmentový displej, kde sú zobrazené.



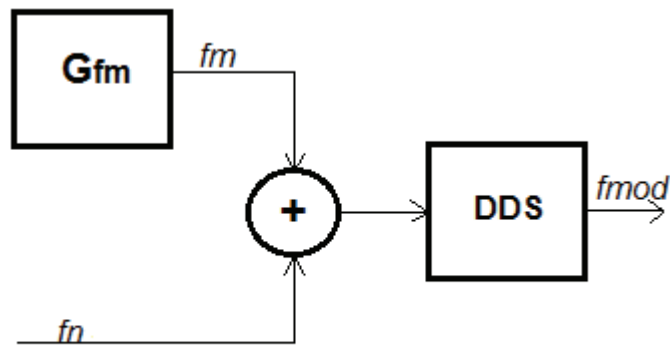
<b>R</b>	riadiaca jednotka,
<b>PC</b>	osobný počítač,
<b>FM1</b>	generátor kmitočtovo modulovaného signálu,
<b>FM2</b>	generátor oneskoreného kmitočtovo modulovaného signálu,
<b>ZM</b>	kmitočtový zmiešavač,
<b>FMD</b>	kmitočtový demodulátor,
<b>D<sub>pp</sub></b>	špičkový detektor,
<b>D<sub>dc</sub></b>	jednosmerný detektor,
<b>f<sub>0</sub></b>	kmitočet nosného signálu,
<b>F</b>	modulačný kmitočet,
<b>o</b>	oneskorenie signálu.

Obr. 4.1.: Blokové schéma simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru

## 4.2 Blok generátor kmitočtovo modulovaného signálu

Princípom kmitočtovej modulácie je závislosť okamžitého kmitočtu nosnej vlny na zmenách amplitúdy modulačného signálu. Z toho vyplýva, že okamžitá uhlový kmitočet je funkciou času a mení sa s okamžitou výchylkou modulačného signálu. Informácia je kódovaná zmenou kmitočtu nosnej vlny. Maximálna amplitúda napätia modulačného priebehu odpovedá maximálna zmena kmitočtu nosnej, ktorá sa nazýva kmitočtový zdvih.

Architektúra digitálneho kmitočtového modulátoru je ukázaná na obrázku 4.2. Systém sa skladá z generátoru modulačného signálu  $G_{fm}$ , zo súčtového člena a bloku DDS (*Direct Digital Synthesizer*). Modulačný signál je sčítaný s konštantou kmitočtu nosnej. Takto vyniknutý signál je privedený na vstup DDS, ta je nastavená na generovanie kmitočtovo modulovaného signálu. Zmena fáze výstupného signálu sa mení podľa vstupného signálu.

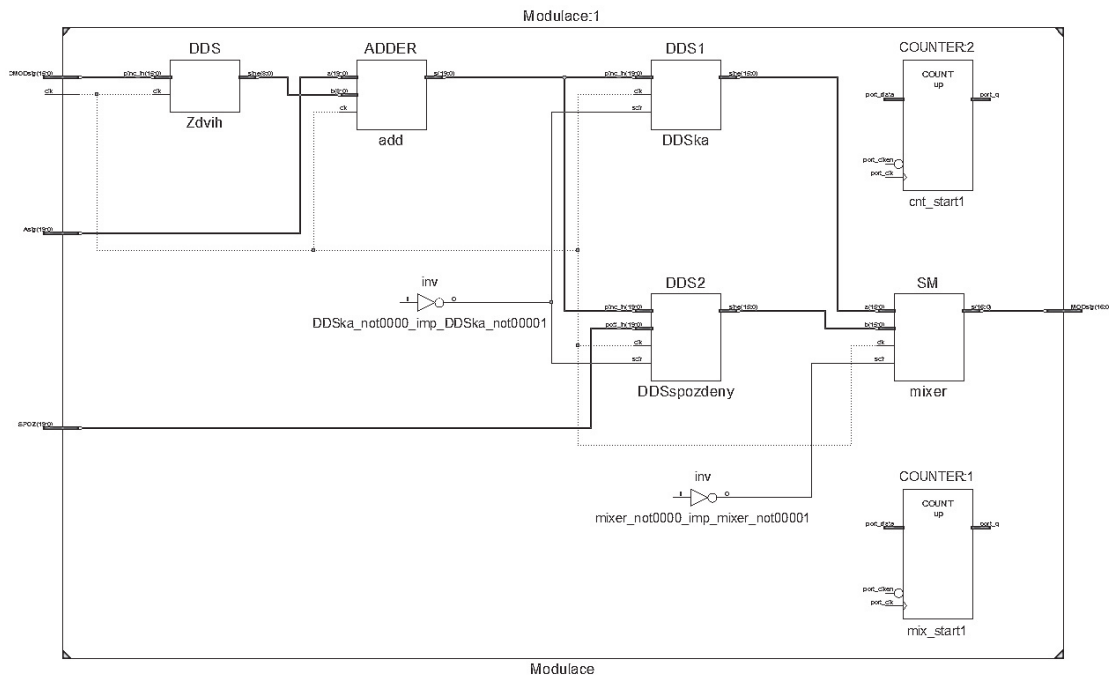


$G_{fm}$	zdroj modulačného signálu,
$f_n$	nosný kmitočet,
DDS	priamy digitálny syntetizátor

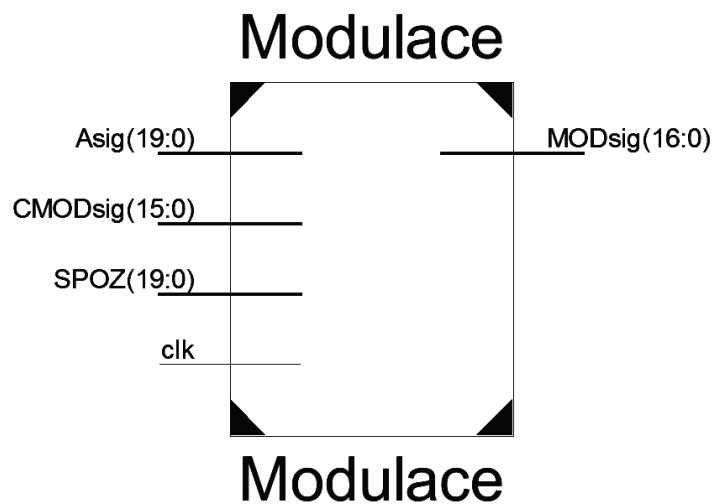
Obr. 4.2.: Zapojenie bloku kmitočtového modulátoru

### 4.2.1 Realizácia bloku generátoru kmitočtovo modulovaného signálu

Blok **Modulace** je tvorený generátorom priameho kmitočtovo modulovaného signálu  $s_1$  a signálu oneskoreného  $s_2$ , čiže fázovo posunutého. Zmiešaný signál  $s_{12}$  je privedený na výstup celého bloku.



Obr. 4.3.: Schéma bloku kmitočtového modulátoru



Obr. 4.4.: Vstupy a výstupy bloku kmitočtového modulátoru signál

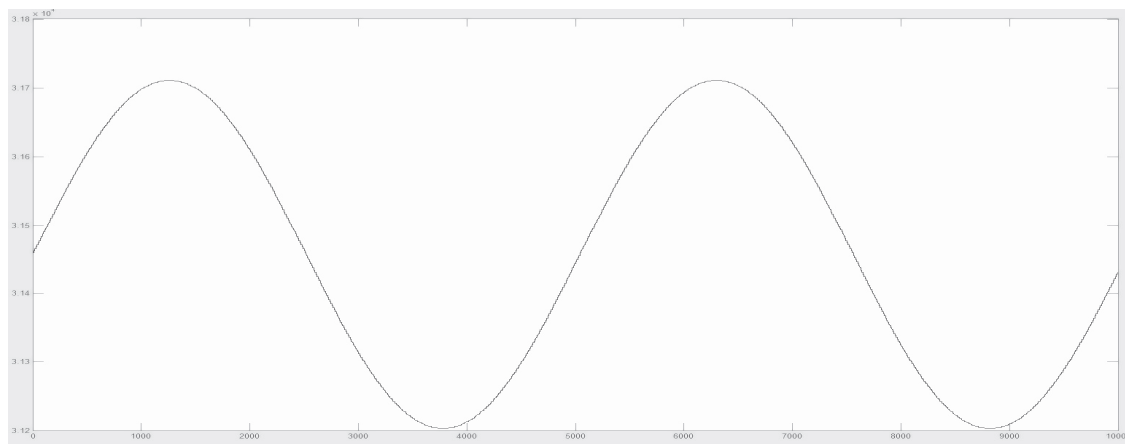
Na vstup bloku **Modulace** sú privedené 4 signály:

clk	hodinový kmitočť,
Asig	kmitočť nosného signálu,
CMODsig	kmitočť modulačného signálu,
SPOZ	veľkosť oneskorenia.

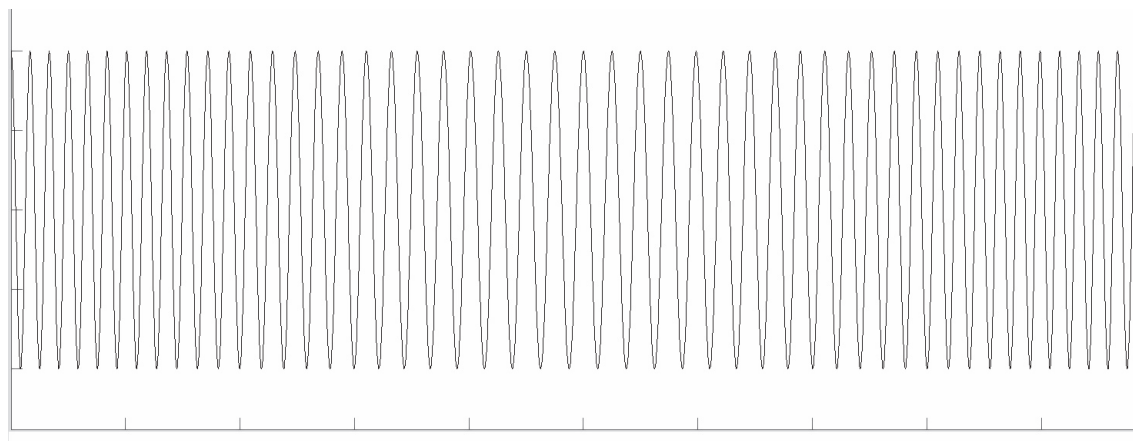


Na výstupe bloku **Modulace** je kmitočtovo modulovaný signál. Tento signál je ďalej pripojený na vstup kmitočtového demodulátora.

Hlavným podblokom s v bloku **Modulace** je priamy číslicový syntetizátor **DDS1** a **DDS2**. Vytvárajú kmitočtovo modulovaný signál. Na ich vstup je privedený inkrement fáze, aby bol vytvorený kmitočtovo modulovaný signál. Tento signál je vytvorený pomocou sčítacieho člena **ADDER**. Na jeho vstupy je pripojená konštanta nosného signálu a harmonický signál reprezentujúci kmitočtový zdvih. Tento signál má vysokú stejnosmernú zložku.



Obr. 4.5.: Priebeh signálu fázového inkrementu



Obr. 4.6.: Priebeh výstupného kmitočtovo modulovaného signálu

#### 4.2.2 Voľba pracovného kmitočtu prípravku

Reálne FM-CW diaľkomerné sústavy pracujú v mikrovlnnom pásme. Pre overenie základných vlastností a princípov zariadenia postačí kmitočet nižší, pretože nie je potrebné signál vysielat' do reálneho prostredia. Stredný kmitočet vysielaného

kmitočtovo modulovaného signálu musí spadať do takej kmitočtovej oblasti, kde je ho možné v navrhovanom obvode realizovať. Horná hranica kmitočtu je ohraničená maximálnym vzorkovacím kmitočtom, aby bolo splnený Nyquistov vzorkovací teorém. Spodná hranica je závislá na prenosovej charakteristike filtra pri demodulácii signálu. Hodinový signál zariadenia je  $f_{clk} = 100\text{MHz}$ , to odpovedá aj vzorkovaciemu kmitočtu v navrhovanom zariadení. Z toho vyplýva že maximálny kmitočet nosného signálu je  $f_0 = 50\text{MHz}$  a minimálny  $1\text{MHz}$ . Experimentálne bolo zistené, že je kmitočty voliť v rozmedzí  $f_0 = 2 - 40\text{MHz}$ .

Kmitočet  $F$  harmonického modulačného signálu musí vyhovovať nasledujúcej podmienke:

- musí byť dostatočne nízky, aby bola splnená podmienka [2]

$$\sin \frac{\Omega T_d}{2} \approx \frac{\Omega T_d}{2} . \quad (4.1)$$

- nesmie byť príliš nízky, aby bolo možné realizovať zariadenie aj v stave merania rýchlosti, kde prístroj nepracuje v kontinuálnom režime. Pre maximálnu rýchlosť  $r = 50\text{km.h}^{-1}$  musí byť splnené podmienka

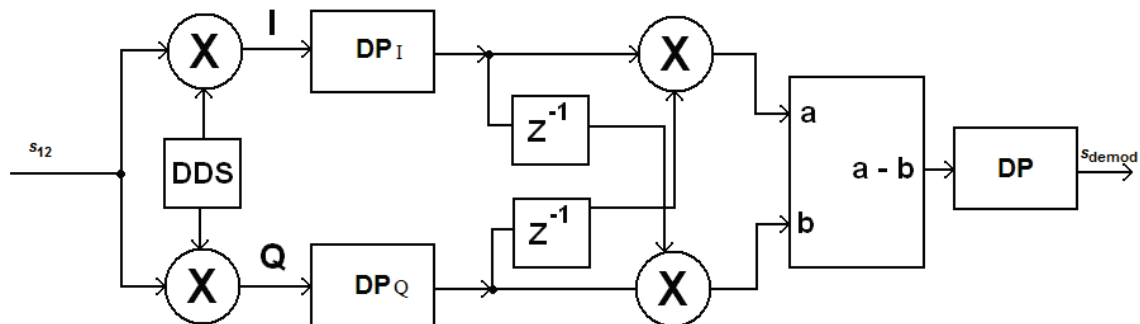
$$F \geq 300 \text{ Hz} . \quad (4.2)$$

Bol preto vybraný kmitočet  $F$  modulačného signálu, ktorý vyhovuje obom podmienkam

$$F = 1\text{kHz} .$$

### 4.3 Blok kmitočtového demodulátoru

Demodulácia slúži na získavanie pôvodných informácií obsiahnutých s modulovanej vlny. Modulovaný signál je privedený na vstup kmitočtového demodulátoru. Na vstupe je pomocou násobičiek a lokálneho oscilátoru  $\sin$  a  $\cos$  priebehu rozdelený na I a Q zložku. Ďalej nasleduje filter typu dolná prepust', ktorého koeficienty boli stanovené tak aby bola odfiltrovaná vysokofrekvenčná časť kmitočtovo modulovaného signálu. Následne sa zložky Q a I medzi sebou násobia, jedna zložka je vždy oneskorená o jeden hodinový takt. Rozdielom týchto dvoch vetiev je demodulovaný signál, ktorý je ešte filtrovaný od nežiaducich

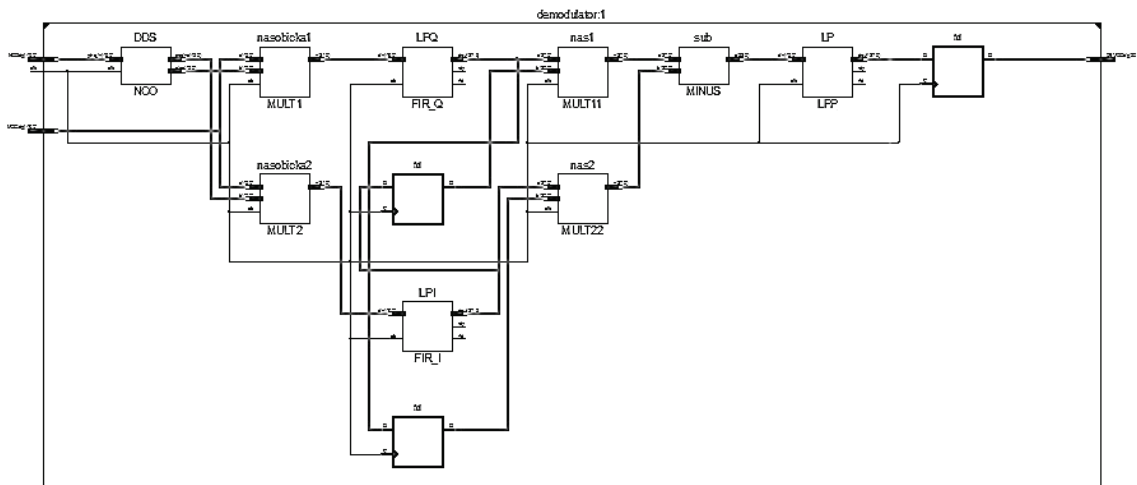


<b>DDS</b>	lokálny oscilátor, zdroj $\sin$ a $\cos$ ,
<b>DPI</b>	filter typu dolná prepust', I zložky signálu,
<b>DPQ</b>	filter typu dolná prepust', Q zložky signálu,
<b>I</b>	I zložka signálu,
<b>Q</b>	Q zložka signálu,
<b>DP</b>	filter typu dolná prepust',
<b><math>Z^{-1}</math></b>	oneskorovací člen,
<b>a - b</b>	rozdielový člen,
<b>X</b>	násobička,
<b><math>s_{12}</math></b>	vstupný kmitočtovo modulovaný signál,
<b><math>s_{demod}</math></b>	výstupný kmitočtovo demodulovaný signál.

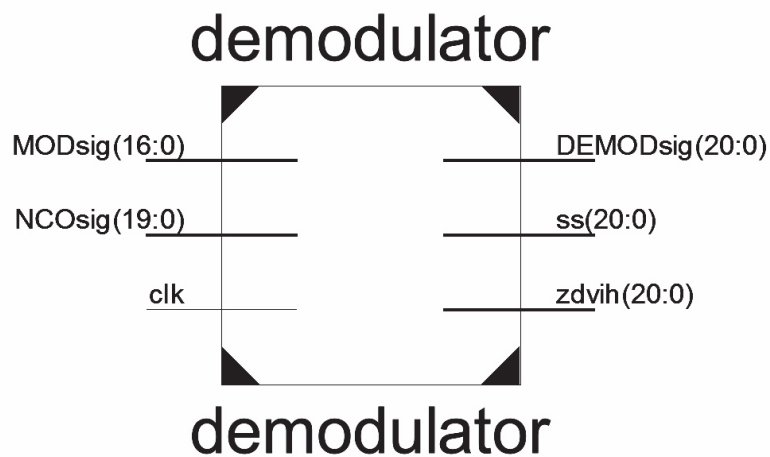
Obr. 4.7.: Zapojenie bloku kmitočtového demodulátoru

#### 4.3.1 Realizácia bloku kmitočtového demodulátoru

Blok **Demodulace** pozostáva z kmitočtového demodulátoru, ktorý demoduluje signál  $s_{12}$ , špičkového detektoru na určenie kmitočtového zdvihu signálu a detektor stejnosmernej zložky. Výstupný demodulovaný signál  $s_{demod}$  je privedený na výstup bloku spolu s hodnotou kmitočtového zdvihu a stejnosmernej zložky.



Obr. 4.8.: Simulované schéma bloku kmitočtového demodulátoru



Obr. 4.9.: Vstupy a výstupy bloku kmitočtového demodulátoru signál

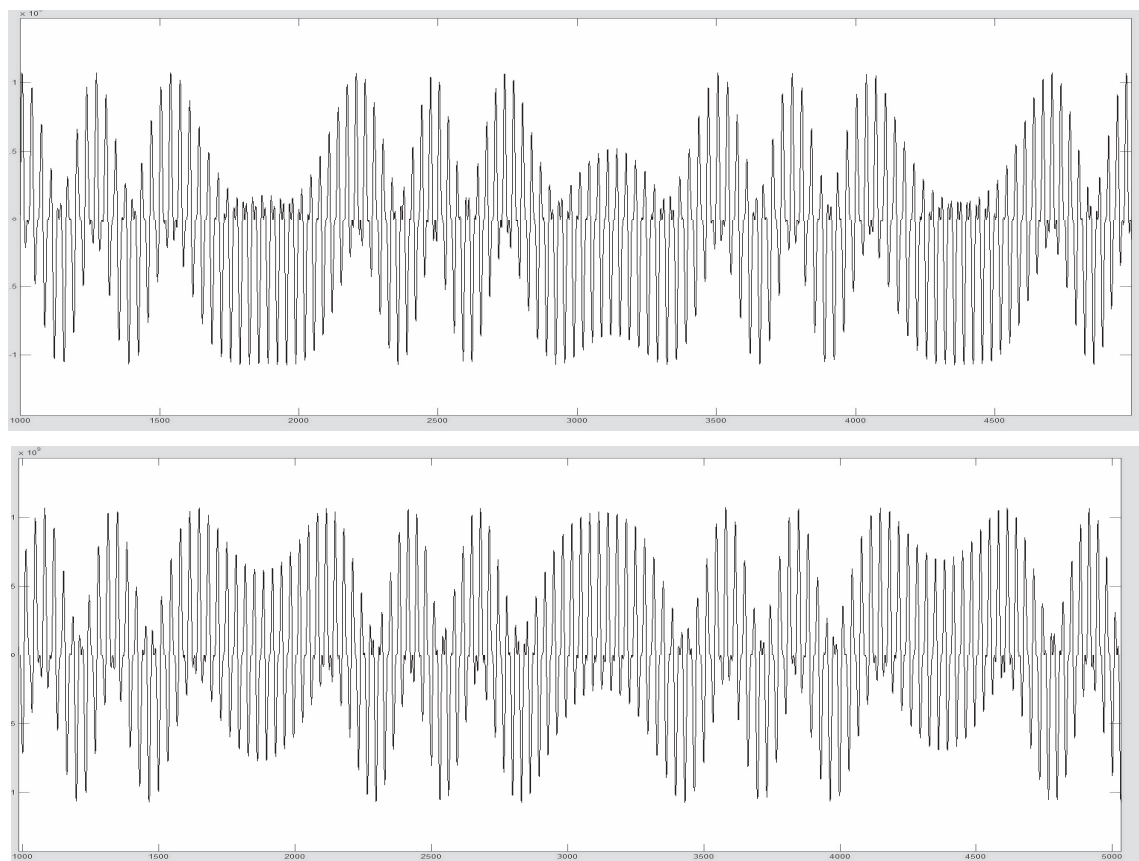
Na vstup bloku **Demodulace** sú privedené 3 signály:

clk	hodinový kmitočť,
MODsig	kmitočťovo modulovaný signál,
NCOsig	kmitočť lokálneho oscilátoru.

Na výstupe bloku **Demodulace** je:

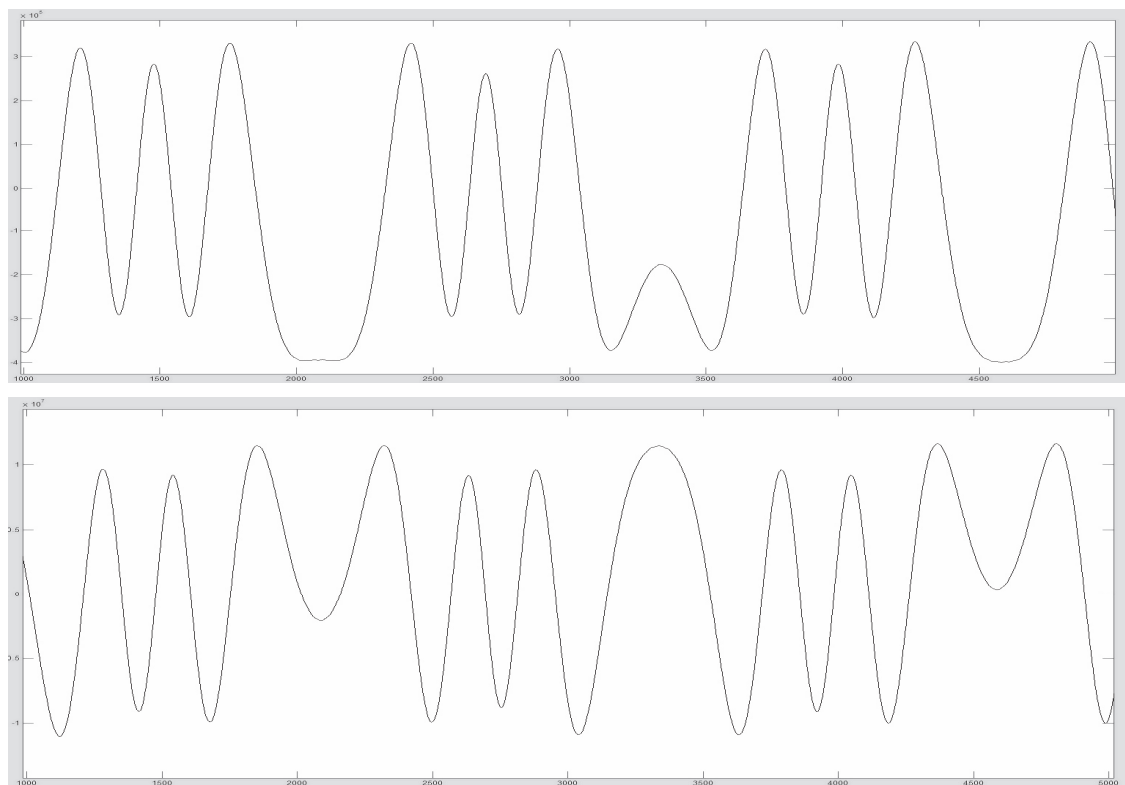
DEMODsig	kmitočťovo demodulovaný signál,
zdvih	kmitočťový zdvih,
ss	veľkosť stejnosmernej zložky.

Kmitočtovo modulovaný signál privedený na vstup demodulátoru je rozdelený pomocou miestneho oscilátoru **NCO**, ktorý je realizovaný pomocou priameho číslicového syntetizátoru **DDS** na reálnu a imaginárnu zložku. **DDS** generuje harmonické priebehy sínus a kosínus o kmitočte nosného signálu. Modulovaný signál je násobený v násobičkách **Nasobicka1** a **Nasobicka2**



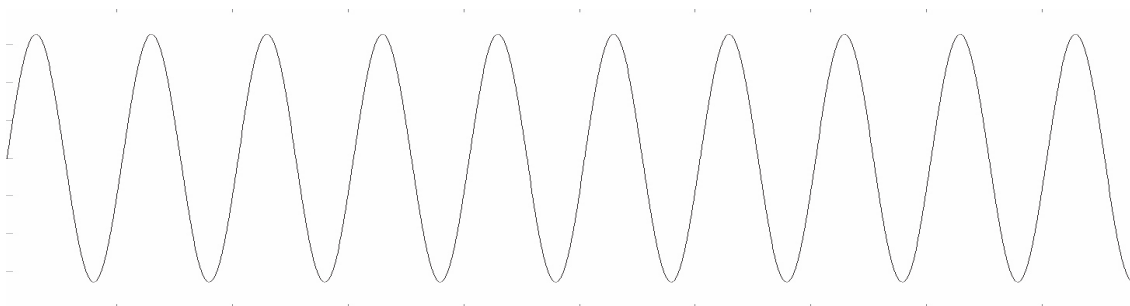
Obr. 4.10.: Priebeh signálu Q a I

Z reálneho a imaginárneho signálu je následne odfiltrovaná vysokofrekvenčná zložka pomocou filtrov FIR. Pre každú zložku je do schémy zaradený jeden filter **LPQ** a **LPI**. Filtre sú realizované ako filtre typu dolná prepust'.



Obr. 4.11.: Priebeh signálu Q a I po filtrácii

Po filtrácii sú obe zložky signálu medzi sebou násobené v násobičkách **Nas1** a **Nas2**. Pri násobení je jeden zo signálov vždy oneskorený o jeden hodinový takt, teda o jednu vzorku. Následne sú Q a I zložky od seba odčítané a dostávame demodulovaný signál. Pri procese odčítania vznikne na demodulovanom priebehu vysokofrekvenčný šum s malou amplitúdou. Preto je nutné zaradiť na koniec ďalší FIR filter typu dolná prepust'.



Obr. 4.12.: Výstupný kmitočtovo demodulovaný signál

Z výstupného demodulovaného priebehu signálu je detekovaná maximálna a minimálna hodnota. Z týchto údajov je určený kmitočtový zdvih  $\Delta f$ . Podľa vzťahu 2.6 sa dopočíta vzdialenosť  $d$

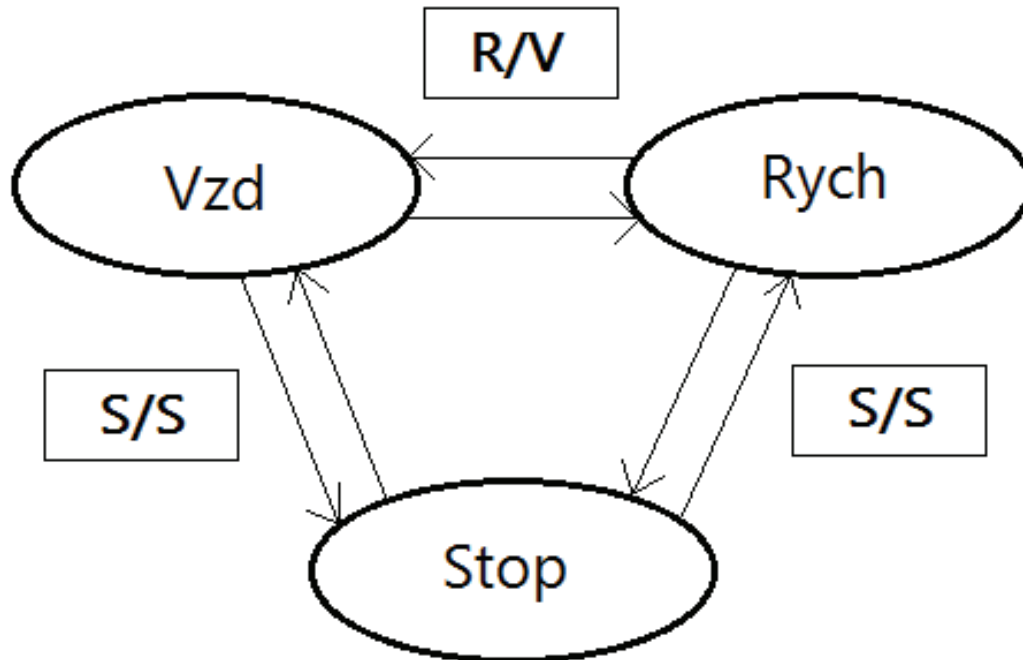
$$\Delta f = \max(f) - \min(f), \quad (4.3)$$

a perióda výstupného demodulovaného signálu, z ktorej je možné zistiť Dopplerov kmitočet. Podľa vzťahu 2.5 sa dopočíta rýchlosť  $v_r$

$$f_D = ss^{-1} - F. \quad (4.4)$$

## 4.4 Blok riadiaca jednotka

Blok riadiacej jednotky má na starosti distribúciu vstupných údajov pre moduláciu a demoduláciu. Namerané hodnoty odosiela na 7 segmentový display. Ďalej obsahuje jednoduchý stavový automat ovládaný dvoma tlačidlami. Tlačidlo 1 **S/S** ovláda zapnutie a vypnutie procesu merania. Tlačidlom 2 **R/V** je možné nastaviť režim merania, meranie vzdialenosti, alebo vzájomnej rýchlosti.



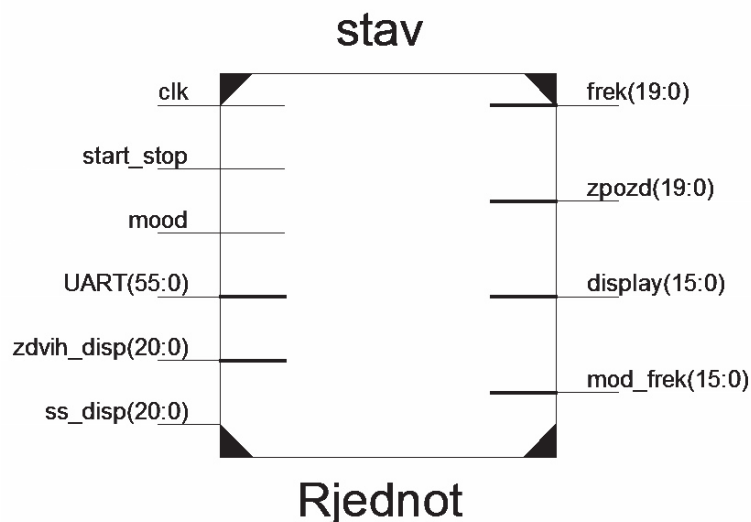
Obr. 4.13.: Stavový automat

Na vstupe bloku riadiacej jednotky je privedených 6 signálov:

clk	hodinový kmitočet,
start_stop	signál z tlačidla S/S,
mood	signál z tlačidla R/V,
UART	slovo obsahujúce riadiace parametre,
zdvih_disp	hodnota kmitočtového zdvihu,
ss_disp	hodnota stejnosmernej zložky.

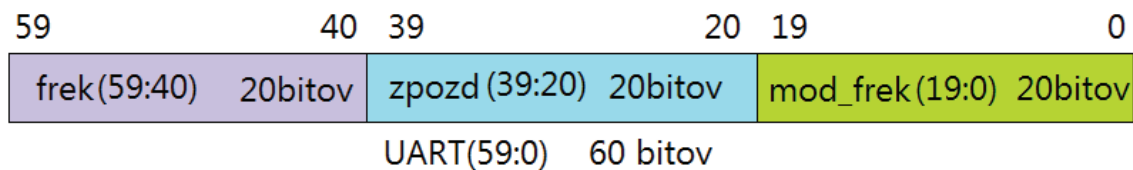
Na výstupe bloku sú vyvedené 4 signály:

frek	kmitočet nosného signálu,
zpoz	oneskorenie signálu $f_2$ ,
display	hodnota zobrazovaná a displeji,
mod_fre	modulačný kmitočet.



Obr. 4.14.: Vstupy a výstupy bloku kmitočtového modulátoru signál

Vstupné slovo UART obsahuje 60 bitov a nesie informácie o kmitočte nosného signálu, oneskorenia signálu  $s_2$ , a veľkosť modulačného kmitočtu, Riadiaca jednotka má za úlohu toto slovo rozdeliť na jednotlivé časti. Rozdelenie vstupného slova vidíme na obrázku 4.15.



Obr. 4.15.: Rozdelenie jedného slova UART

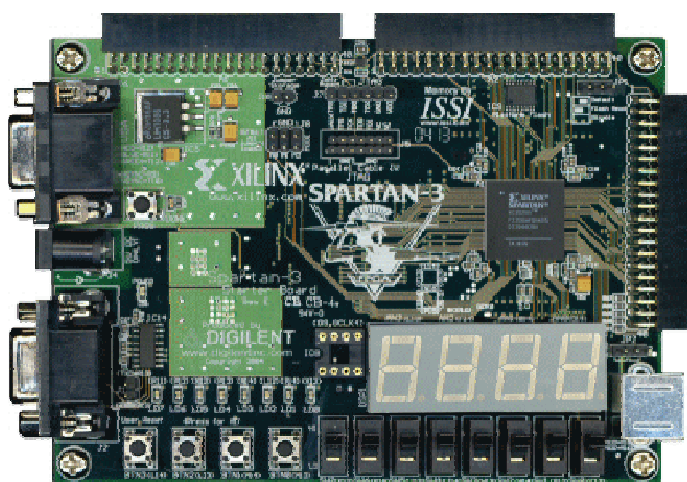


## **4.5 Komunikácia s osobným počítačom**

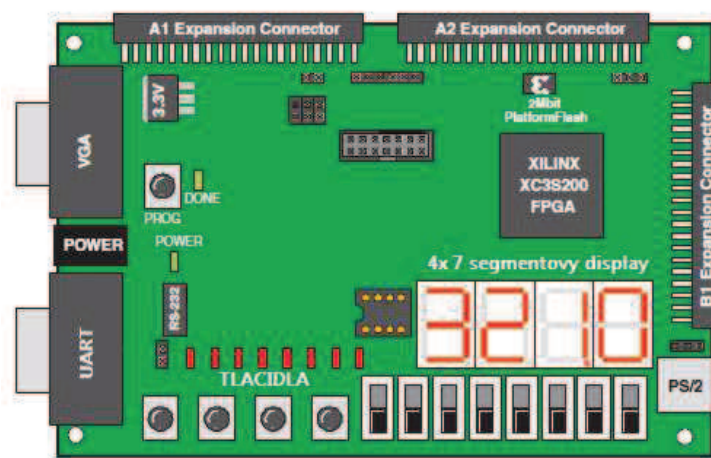
Vstupné parametre sa zadávajú do prípravku pomocou osobného počítača. Bolo potrebné zvoliť vhodné metódu prenosu informácií do prípravku. Dôležitým faktorom pri výbere komunikačného rozhrania je objem dát potrebných na prenesenie. V tomto prípade nie je potrebná vysoká rýchlosť a množstvo prenesených dát. Vhodným rozhraním bola zvolená sériová linka UART.

## 5 TECHNICKÉ PREVEDENIE ZARIADENIA

Zariadenie je realizované pomocou programovateľného logického obvodu FPGA. V tomto prípade je výroba plošného spoja a jeho realizácia technicky náročná, pre vysoký počet vstupných a výstupných pinov na relatívne malej ploche puzdra logického obvodu. Preto, po dohode s vedúcim diplomovej práce, bolo rozhodnuté, že pre prípadnú následnú realizáciu simulátoru diaľkomeru bude použitá vývojová doska XILINX Spartan - 3, na ktorej budú všetky funkčné bloky prípravku a odpovedajúce operácie modulátoru a demodulátoru naprogramované. Výhodou tejto realizácie je, že doska v sebe obsahuje všetky potrebné rozhrania, ktoré sú z veľkej časti využité. Sú to Sériová linka, 7 segmentový display, tlačidlá.



Obr. 5.1.: Vývojová doska Spartan-3 Starter Kit Board

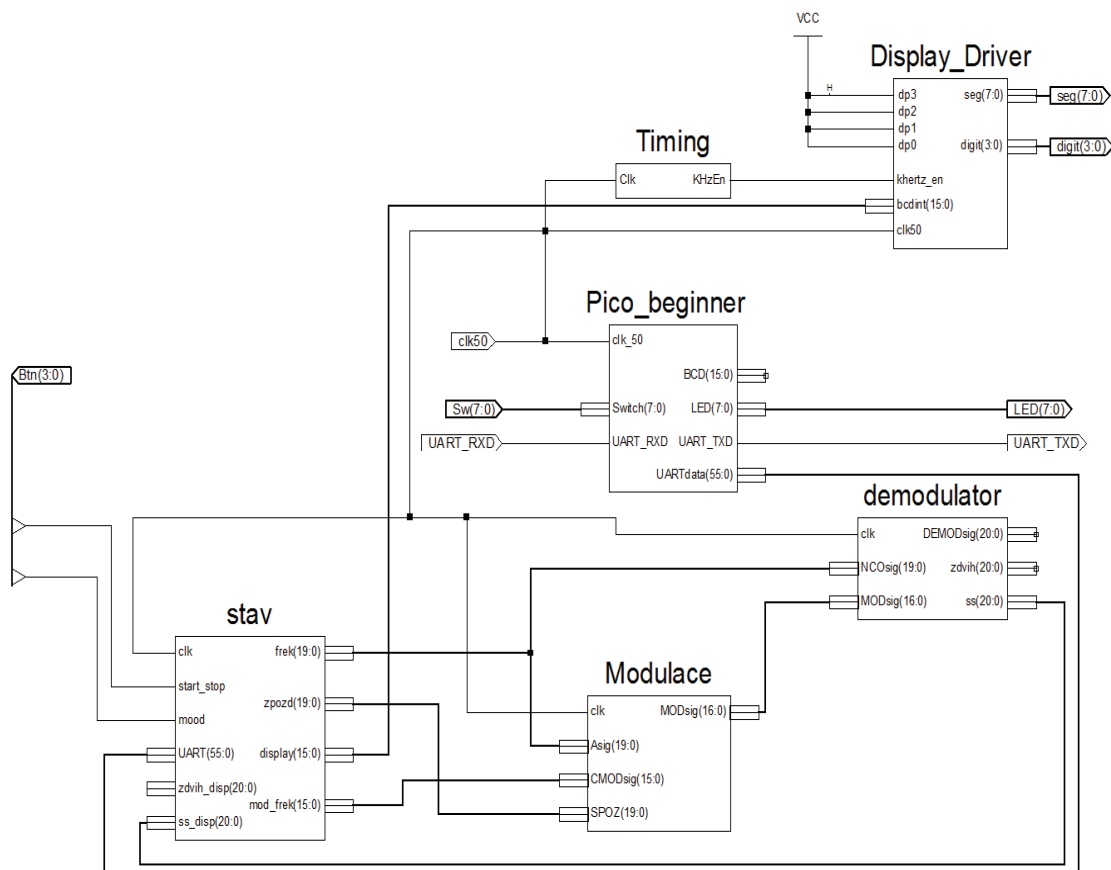


Obr. 5.2.: Vývojová doska graficky Spartan-3 Starter Kit Board [7]

## 5.1 Vnútorné schéma obvodu

Z obrázku 5.2. je možné vidieť vnútorné zapojenie programovateľného logického obvodu FPGA. Bloky **Modulace**, **Demodulátor** a **Stav** boli podrobne popísané v kapitolách 4.2 až 4.4. Bloky **Timing**, **Display\_Driver** a **Pico\_beginner** sa podieľajú na riadení celého zariadenia

Blok **Timing** vytvára signál o kmitočte 1kHz, ktorý je pripojený na blok **Display\_Driver**. Tento blok funguje ako ovládač pre použitý 7 segmentový display. Dátovým vstupom je bcdint na ktorý sú privedené aktuálne hodnoty z riadiacej jednotky. Dôležitou súčasťou zariadenia je blok **Pico\_beginner**, ktorý zaisťuje komunikáciu cez UART. V tomto bloku je implementovaný procesor PicoBlaze.



Obr. 5.3.: Vnútorné schéma zapojenia FPGA

### 5.1.1 Implementácia procesoru do obvodu FPGA

Dnešné obvody FPGA z princípu obsahujú všetko, čo je potrebné pre vytvorenie štruktúry procesoru. Najmä to sú pamäťové bloky, ktoré môžu slúžiť ako pamäť ROM, teda pamäť programu procesoru, aj ako pamäť RAM vo funkcií pamäti dát, zásobníka a ďalších pamäťových štruktúr. Je teda možné nakonfigurovať ich tak, že obsahujú tzv. procesorové jadro, tj. konštrukcia predstavujúca časť hradlového poľa s konfiguráciou v súhlase so zapojením procesoru, ktoré sa v tomto poli pripoja k ďalším blokom.

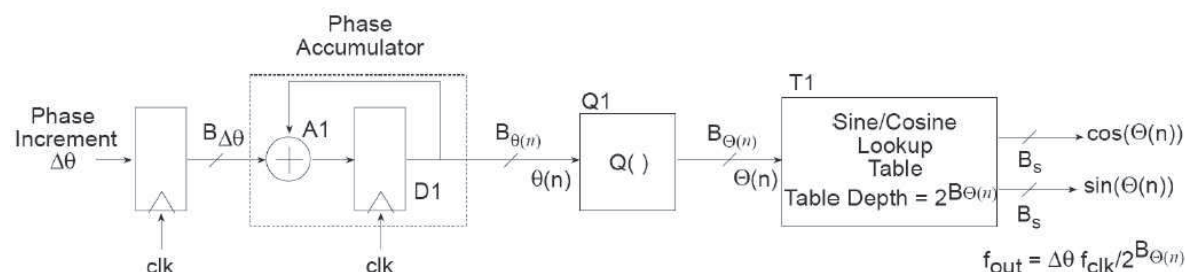
Procesor PicoBlaze bol vyvinutý pracovníkmi firmy Xilinx a môže byť implementovaný do obvodu FPGA tejto firmy. Je to osembitový harvardský procesor typu RISC. Procesorové jadro PicoBlaze (FPGA typu Spartan-3) [5]:

- pamäť programu pre 1000 inštrukcií.
- 16 rovnoprávných osembitových registrov označených s0 až sF, ktoré môžu byť všetky použité ako striadač
- aritmeticko-logickú jednotku ALU pre prevádzanie operácií obvyklých u jednoduchých procesorov s príznakmi nuly a prenosu, ktoré je možné použiť k vetveniu programu
- zápisníkovú pamäť s rozsahom 64 byte
- zásobník dovoľujúci prevádzať podprogram až do 31 úrovni
- jednoduchý prerušovaný systém s jedným programovo maskovateľným prerušením
- 256 osembitových vstupov a rovnaký počet osembitových výstupov so vzorkovacími signálmi a s priamym alebo nepriamym adresovaním
- nulovací vstup (reset) k vyvolaniu definovaného počiatočného stavu procesoru

V tejto aplikácii slúži na podporu komunikácie pomocou UART.

### 5.1.2 Nadstavenie priamej číslicovej syntézy

Priama číslicová syntéza sa používa pre generovanie harmonických priebehov sínus, alebo kosínus. Je možné taktiež vytvoriť za pomoci tohto bloku kmitočtovo modulovaný, amplitúdovo alebo fázovo modulovaný signál.



Obr. 5.4.: Základné stavebné bloky DDS [6]

V aplikácii simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru je DDS využité ako generátor priebehu kmitočtového zdvihu, generátor kmitočtovo modulovaného signálu a ako lokálny generátor priebehov sínus a kosínus pri demodulácii.

Pre generovanie harmonického priebehu sínus alebo kosínus, ktorého kmitočtet chceme meniť, nastavíme DDS na streamovanie inkrementu fáze, teda aktivujeme vstupný pinc\_in. Veľkosť inkrementu nesmieme počas merania meniť, pretože by sa zmenil okamžitý kmitočtet vysielaného signálu. Veľkosť tohto fázového prírastku určíme zo vzťahu [6]

$$\Delta\Theta = \frac{f_{\text{out}} \cdot 2^{B_{\Theta(n)}}}{f_{\text{clk}}} . \quad (5.1)$$

V tomto prípade je požadujeme kmitočtet nosného signálu napríklad  $f_{\text{out}} = 3\text{MHz}$ . Použitý je 20 bitový fázový akumulátor a kmitočtet hodinového signálu 100 MHz

$$\Delta\Theta = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 2^{20}}{100 \cdot 10^6} = 31457 . \quad (5.2)$$

Pri požiadavku na generovanie kmitočtovo modulovaného signálu je nastavenie DDS obdobné, s rozdielom že veľkosť fázového prírastku sa bude s časom periodicky meniť. Pre dosiahnutie nosného signálu  $f_{\text{out}} = 3\text{MHz}$  je potrebný fázový prírastok  $\Delta\Theta = 31457$ . Požadovaný kmitočtový zdvih je  $\Delta f = 1\text{kHz}$

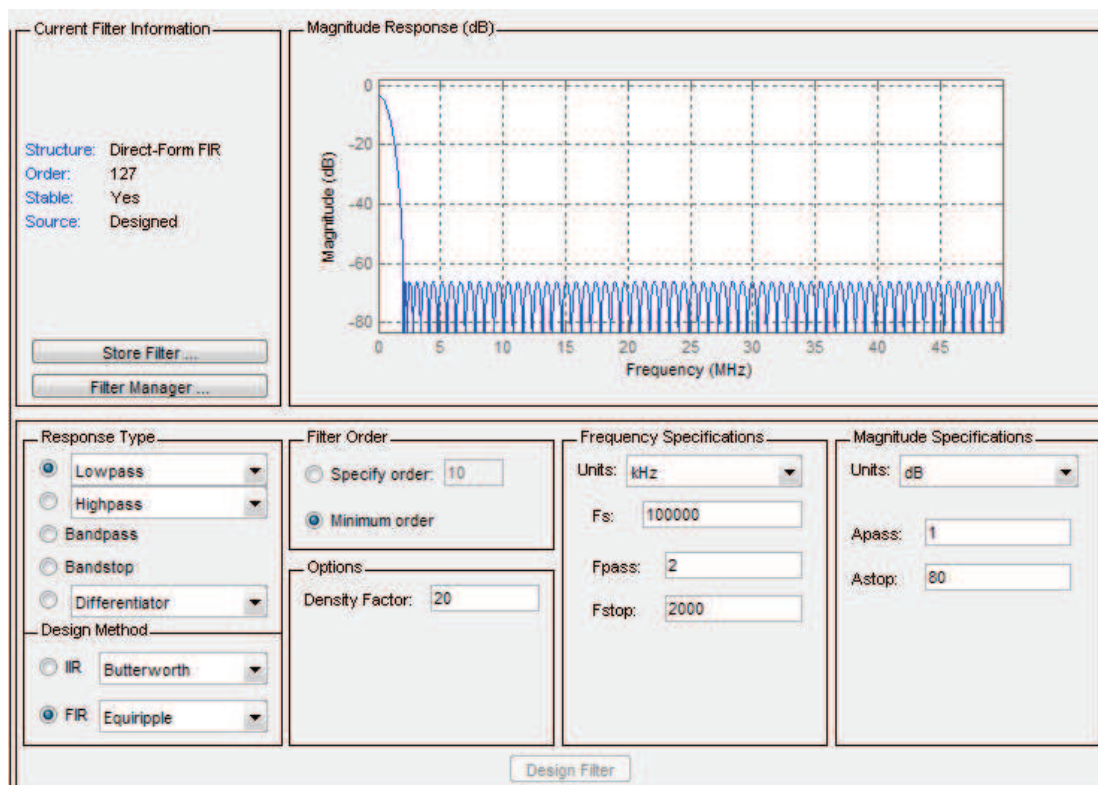
$$\Delta\Theta = \frac{1000 \cdot 2^{20}}{100 \cdot 10^6} = 11 . \quad (5.3)$$

Z toho vyplýva, že pre generáciu kmitočtovo modulovaného signálu o s nosným signálom o kmitočte  $f_n = 3\text{MHz}$  a kmitočtovom zdvihu  $\Delta f = 1\text{kHz}$  je potrebný fázový prírastok  $\Delta\Theta = 31457 \pm 11$ . Tento údaj je zadávaný v binárnej podobe.

### 5.1.3 Nadstavenie filtru FIR

FIR Compiler je IP jadro, ktoré poskytuje spoločné rozhranie pre užívateľa a prekladač. Umožňuje vytvárať vysoko parametrizovateľné, efektívne a výkonné filtre FIR s využitím Multiply-accumulate (MAC) alebo Distribuovanej aritmetiky (DA) .

V prípravku sú tri filtre FIR koncipované ako dolná prepust' v bloku **Demodulace**. Slúžia na odstránenie vysokofrekvenčnej zložky kmitočtovo modulovaného signálu. Nadstavenie filtru sa robí pomocou koeficientov, ktoré boli vygenerované pomocou programu Matlab v podprograme FDataool. Koeficienty sú priamo nahrané do IP jadra.



Obr. 5.5.: Fdatool

## 5.2 Určenie nepresnosti merania

Oproti riešeniu pomocou analógových obvodov, je pomerne jednoduché určiť celkovú relatívnu chybu merania tohto simulátoru FM-CW diaľkomeru. Chyby vynikajú nepresnosťou oscilátorov, alebo pri zaokrúhľovaní dlhého bitového slova na menšie.

Určenie relatívnej chyby oscilátoru DDS, DDS1, DDS2 a NCO. Najprv je nutné si určiť maximálnu kmitočtovú rozlíšiteľnosť [6]

$$\Delta f = \frac{f_{\text{clk}}}{2^{B_{\Theta(n)}}}, \quad (5.4)$$

numericky hodinový kmitočet  $f_{\text{clk}} = 100 \text{ MHz}$ , počet bitov fázového akumulátoru  $B_{\Theta(n)} = 20$  bitov

$$\Delta f = \frac{10^8}{2^{20}} = 95,36 \text{ Hz}. \quad (5.5)$$

Z toho vyplýva veľkosť relatívnej chyby pre DDS, kde je generovaný signál o kmitočte  $f_{\text{DDS}} = 1\text{kHz}$

$$\delta_{\text{DDS}} = \frac{\Delta f}{f_{\text{DDS}}} = \frac{95,36}{1000} = 0,09536, \quad (5.6)$$

veľkosť relatívnej chyby oscilátoru DDS1 a DDS2 a NCO, generovaný signál je s kmitočtom  $f_{\text{DDS1,2}} = 3\text{MHz}$

$$\delta_{\text{DDS1,2,NCO}} = \frac{\Delta f}{f_{\text{DDS1,2,NCO}}} = \frac{95,36}{3 \cdot 10^6} = 3,1786 \cdot 10^{-5}. \quad (5.7)$$

Chyba pri zaokrúhľovaní výstupu z bloku MULT1 a MULT2

$$\delta_{\text{MULT1,2}} = \frac{\Delta B_1}{B_1} = \frac{1}{131071} = 7,629 \cdot 10^{-6}, \quad (5.8)$$

chyba pri zaokrúhľovaní výstupu z bloku MULT11 a MULT22

$$\delta_{\text{MULT11,22}} = \frac{\Delta B_2}{B_2} = \frac{1}{5,4975 \cdot 10^{11}} = 1,819 \cdot 10^{-12}, \quad (5.9)$$

chyba pri zaokrúhľovaní výstupu z bloku MINUS

$$\delta_{\text{MINUS}} = \frac{\Delta B_3}{B_3} = \frac{1}{65535} = 1,526 \cdot 10^{-5}, \quad (5.10)$$

chyba pri zaokrúhľovaní výstupu z bloku LPP

$$\delta_{\text{LPP}} = \frac{\Delta B_4}{B_4} = \frac{1}{2097151} = 4,76 \cdot 10^{-7}. \quad (5.11)$$

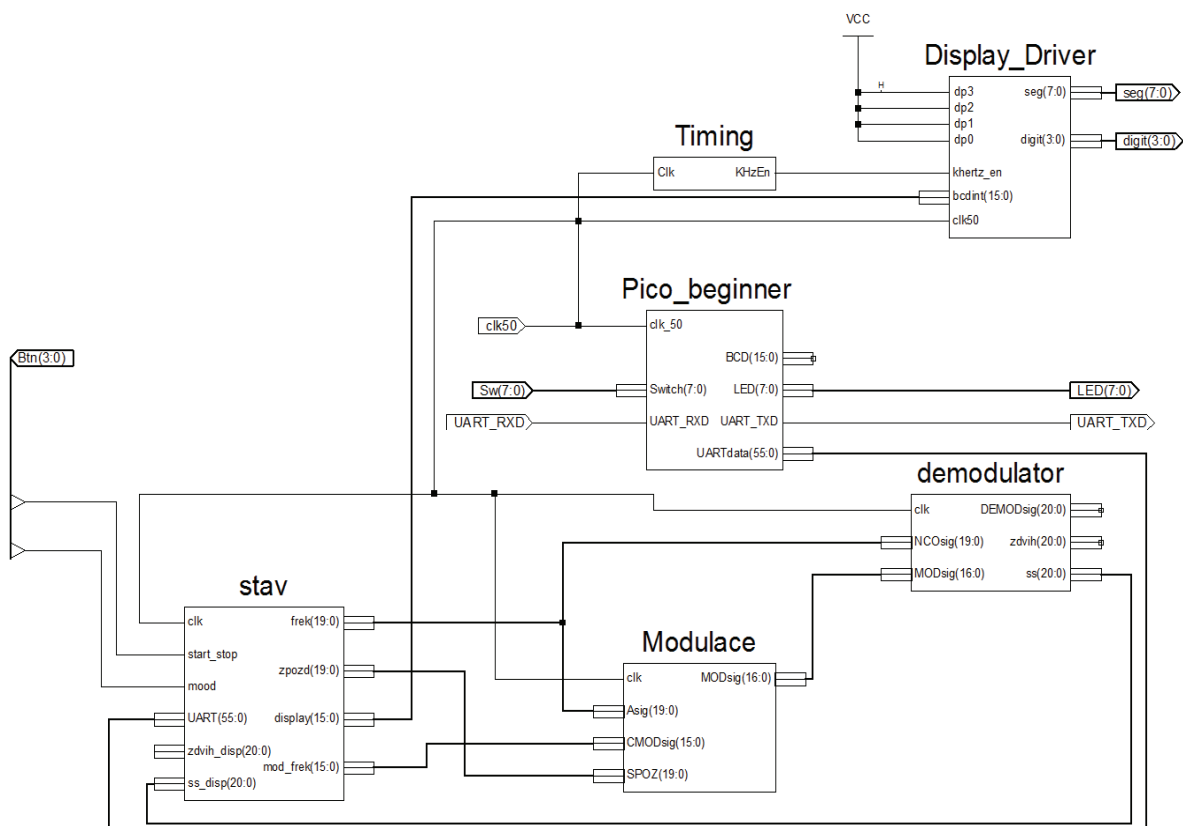
Maximálna relatívna chyba je potom určená vzťahom  $\delta_Z$

$$\begin{aligned} |\delta_Z| &= |\delta_{\text{DDS}}| + |\delta_{\text{DDS1}}| + |\delta_{\text{DDS2}}| + |\delta_{\text{NCO}}| + |\delta_{\text{MULT1}}| + |\delta_{\text{MULT2}}| + |\delta_{\text{MULT11}}| + \\ &+ |\delta_{\text{MULT22}}| + |\delta_{\text{MINUS}}| + |\delta_{\text{LPP}}| = 0,09536 + 3,1786 \cdot 10^{-5} + 3,1786 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 3,1786 \cdot 10^{-5} + 7,629 \cdot 10^{-6} + 7,629 \cdot 10^{-6} + 1,819 \cdot 10^{-12} + 1,819 \cdot 10^{-12} + \\ &+ 1,526 \cdot 10^{-5} + 4,76 \cdot 10^{-7} = 0,09548 = 9,548\% \end{aligned} \quad (5.12)$$

Zo vzťahu vyplýva, že najväčšiu chybu vytvára generátor kmitočtového zdvihu, pre potlačenie tejto chyby je nutné zvýšiť prírastok fázy v tomto generátore.

## 6 RIADIACI PROGRAM

Riadiaci program, a teda zdrojový kód je napísaný v programovacom jazyku VHDL. Celý program sa skladá z jednotlivých podblokov **Stav**, **Modulace**, **Demodulator**, **Pico\_beginner**, **Timing** a **Display\_Driver**. Tieto bloky sú pre väčšiu prehľadnosť poprepájané pomocou modelu Schematic.



Obr. 6.1: Schéma modulov v hlavnom programe

### 6.1 Modul Pico\_beginner

Modul zabezpečuje komunikáciu pomocou rozhrania UART. Je k tomu využitý implementovaný procesor PicoBlaze. Používajú sa 8 bitové registre, preto je nutné prenášané údaje rozdeliť.



```

-- Processor input port multiplexer
PROC_port_In_MUX: PROCESS(clk_50) BEGIN
  IF clk_50'EVENT AND clk_50 = '1' THEN
    CASE Pico_Port_ID IS
      WHEN UART_data_PORT_ID => Pico_Data_in <= UART_Data_out;
      WHEN UART_stat_PORT_ID => Pico_Data_in <= UART_Stat_out;
      WHEN UART_01_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 63 DOWNT0 56);
      WHEN UART_02_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 55 DOWNT0 48);
      WHEN UART_03_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 47 DOWNT0 40);
      WHEN UART_04_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 39 DOWNT0 32);
      WHEN UART_05_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 31 DOWNT0 24);
      WHEN UART_06_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 23 DOWNT0 16);
      WHEN UART_07_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 15 DOWNT0 8 );
      WHEN UART_08_PORT_ID   => Pico_Data_in <= UART_reg( 7 DOWNT0 0 );
      WHEN LED_PORT_ID       => Pico_Data_in <= LED_reg;
      WHEN OTHERS            => Pico_Data_in <= (OTHERS => '0');
    END CASE;
  END IF;
END PROCESS PROC_port_In_MUX;

-----
-- Processor output port multiplexer
PROC_port_Out_MUX: PROCESS(clk_50) BEGIN
  IF clk_50'EVENT AND clk_50 = '1' THEN
    IF Pico_wr = '1' THEN
      CASE Pico_Port_ID IS
        WHEN UART_01_PORT_ID => UART_reg( 63 DOWNT0 56) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_02_PORT_ID => UART_reg( 55 DOWNT0 48) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_03_PORT_ID => UART_reg( 47 DOWNT0 40) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_04_PORT_ID => UART_reg( 39 DOWNT0 32) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_05_PORT_ID => UART_reg( 31 DOWNT0 24) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_06_PORT_ID => UART_reg( 23 DOWNT0 16) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_07_PORT_ID => UART_reg( 15 DOWNT0 8 ) <= Pico_Data_out;
        WHEN UART_08_PORT_ID => UART_reg( 7 DOWNT0 0 ) <= Pico_Data_out;
        WHEN LED_PORT_ID     => LED_reg <= Pico_Data_out;
        WHEN OTHERS          => NULL;
      END CASE;
    END IF;
  END IF;
END PROCESS PROC_port_Out_MUX;

```

Priradenie do jednotlivých registrov je nutné zapísať aj do zdrojového kódu procesoru PicoBlaze. Procesor najprv monitoruje vstupnú sekvenciu dát, takzvané testovacie bity. Po ich správnom overení nasleduje zápis do registrov. Ukončenie prenosu je indikované zablikaním LED diód.

receive:	CALL	GetChar	; volanie funkcie na citanie
	COMP	chreg,\$AA	; porovnanie
	JUMP	NZ, receive	; ak neplatí, skok na zaciatok
	CALL	GetChar	; volanie funkcie na citanie
	COMP	chreg,\$55	; porovnanie
	JUMP	NZ, receive	; ak neplatí, skok na zaciatok
	CALL	GetChar	; volanie funkcie na citanie
	LOAD	chreg,MODEM_01	; zapis do registru
	CALL	GetChar	
	LOAD	chreg,MODEM_02	
	CALL	GetChar	
	LOAD	chreg,MODEM_03	
	CALL	GetChar	
	LOAD	chreg,MODEM_04	

```

CALL    GetChar
LOAD    chreg,MODEM_05
CALL    GetChar
LOAD    chreg,MODEM_06
CALL    GetChar
LOAD    chreg,MODEM_07
CALL    GetChar
LOAD    chreg,MODEM_08

LOAD    Temp1,$FF                ; LEDs ON
OUT      Temp1,LED                ; write valu to LED register
CALL     wait_100ms              ; 100 ms LED blik
LOAD     Temp1,$00               ; LEDs OFF at startup

JUMP     receive                 ; nekonecna smycka

```

Teraz ostáva len priradiť prijaté dáta na výstup bloku Pico\_beginner.

```

UARTdata <= UART_reg;
LED <= LED_reg;

```

## 6.2 Modul Stav

Obsahuje stavový automat ktorý ma starosti riadenie procesu merania. Sú tu implementované módy na meranie vzdialenosti, rýchlosti a zastavenie merania. Medzi týmito stavmi je možné prepínať pomocou tlačidiel.

```

TYPE t_state IS (Vzd, Rych, Stop);           -- jednotlivé stavy
SIGNAL pres_state, next_state:  t_state := Stop; -- signály prechodu medzi
                                                    stavmi

PROCESS(pres_state) BEGIN
  CASE pres_state IS                        -- vyber stavu

    WHEN Vzd => vzd_enable <= '1';         -- zapnute meranie vzdialenosti
               rych_enable <= '0';         -- vypnute meranie rychlosti
               cnt_reset  <= '0';         -- vypnute nulovanie
               disp_enable <= '1';         -- display on

    WHEN Rych => rych_enable <= '1';        -- zapnute meranie rychlosti
               vzd_enable <= '0';         -- vypnute meranie vzdialenosti
               cnt_reset  <= '0';         -- vypnute nulovanie
               disp_enable <= '1';         -- display on

    WHEN Stop => vzd_enable <= '0';         -- vypnute meranie vzdialenosti
               rych_enable <= '0';         -- vypnute meranie rychlosti
               cnt_reset  <= '1';         -- zapnute nulovanie
               disp_enable <= '0';         -- display off

  END CASE;
END PROCESS;

```

```

PROCESS(pres_state, start_stop_press, mood_press) BEGIN
CASE pres_state IS
-- riadenie zmeny stavu

WHEN Vzd => IF start_stop_press = '1' THEN next_state <= Stop;
ELSIF mood_press = '1' THEN next_state <= Rych;
ELSE next_state <= Vzd;
END IF;

WHEN Rych => IF start_stop_press = '1' THEN next_state <= Stop;
ELSIF mood_press = '1' THEN next_state <= Vzd;
ELSE next_state <= Rych;
END IF;

WHEN Stop => IF start_stop_press = '1' THEN next_state <= Vzd;
ELSE next_state <= Stop;
END IF;

END CASE;
END PROCESS;

PROCESS (clk) BEGIN
IF rising_edge(clk) THEN
pres_state <= next_state; -- priradenie zmeny stavu na aktualny stav
END IF;
END PROCESS;

```

Po zvolení procesu program priradí na výstupy riadiacej jednotky reprezentujúce signály.

```

PROCESS (clk) BEGIN
IF rising_edge(clk) THEN
IF cnt_reset = '1' THEN
-- nulovanie vystupov
frek <= "00000000000000000000";
zpozd <= "00000000000000000000";
mod_frekw <= "00000000000000000000";

ELSIF vzd_enable = '1' THEN
-- priradenie hodnot z UART
frekw <= UART(59 downto 40);
zpozdw <= UART(39 downto 20);
mod_frekw <= UART(19 downto 0);

ELSIF rych_enable = '1' THEN
-- priradenie hodnot z UART
frekw <= UART(59 downto 40);
zpozdw <= pom; -- premenlivej faze
mod_frekw <= UART(19 downto 0);

END IF;
END IF;
END PROCESS;

```

Simulácia rýchlosti je reprezentovaná čítačom s premenlivou dĺžkou kroku, rýchlosť je preto možné simulovať v krátkych úsekoch za sebou.

```

PROCESS (clk) BEGIN
IF rising_edge(clk) THEN
IF pom(pom'HIGH) = '0' THEN
pom <= pom + rychlost;
ELSE pom <= "00000000000000000000";
END IF;
END IF;
END PROCESS;

```

Odoslanie nameraných dát na display.

```
PROCESS (clk) BEGIN
    IF rising_edge(clk) THEN
        IF disp_enable = '1' AND vzd_enable <= '1' THEN
            display <= zdvih_disp(15 downto 0);
        ELSIF disp_enable = '1' AND rych_enable <= '1' THEN
            display <= ss_disp(15 downto 0);
        END IF;
    END IF;
END PROCESS;
```

## 6.3 Modul Timing

Generuje signál 1kHz, ktorý je potrebný pre ovládanie bloku displeja. Najprv je vytvorený signál o kmitočte 1MHz a z neho je obdobne vytvorený výstupný signál 1kHz.

```
PROCESS (clk) BEGIN
    IF clk'event AND clk = '1' THEN
        IF mhertz_en = '1' THEN -- clock enable
            khertz_count <= khertz_count + 1;
        IF khertz_count = "1111100111" THEN -- 999
            khertz_en <= '1';
            khertz_count <= (OTHERS => '0');
        ELSE
            khertz_en <= '0';
        END IF;
    ELSE
        khertz_en <= '0';
    END IF;
END IF;
END PROCESS;
```

## 6.4 Modul Modulace

Funkciu plnia implementované IP jadrá, ktoré sú poprepájané a nadstavené tak, aby si celý modul generoval kmitočtovo modulovaný signál zmiešaný s oneskoreným signálom. Jednotlivé generátory vykazujú oneskorenie, preto je nutné iné bloky spúšťať s oneskorením. Na to je využitý jednoduchý čítač.

```
PROCESS (clk) BEGIN
    IF rising_edge(clk) THEN
        IF mix_start(mix_start'HIGH) = '0' THEN
            mix_start <= mix_start + 1;
        END IF;
    END IF;
END PROCESS;
```

## 6.5 Modul Demodulator

Jeho prevažnú časť tvoria taktiež IP jadra. **Demodulator** taktiež vyhodnocuje kmitočtový zdvih a určuje Dopplerov kmitočtet. Pri určovaní kmitočtového zdvihu je vyhodnocovaná maximálna a minimálna veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu.

```
PROCESS(clk) BEGIN
    IF rising_edge(clk) THEN
        IF DEMODxsig > MAXdemod THEN
            MAXdemod <= DEMODxsig;
        END IF;
        IF DEMODxsig < MINdemod THEN
            MINdemod <= DEMODxsig;
        END IF;
        zdvih <= MAXdemod - MINdemod;
    END IF;
END PROCESS;
```

Pri určovaní Dopplerového kmitočtu je nutné najprv zistiť kmitočtet výstupného demodulovaného signálu.

```
PROCESS(clk) BEGIN
    IF rising_edge(clk) THEN
        IF DEMODxsig = MAXdemod THEN
            pom <= "000000000000000000000000";
        END IF;
        IF DEMODxsig > MAXdemod AND DEMODxsig < MINdemod THEN
            pom <= pom + 1;
        END IF;
        IF DEMODxsig = MINdemod THEN
            ss <= pom;
        END IF;
    END IF;
END PROCESS;
```

Hodnoty maxima a minima sú periodicky nulované pre každé meranie. Nie je možné meniť rýchlosť, alebo vzdialenosť počas merania. Prístroj by vykazoval nesprávne hodnoty.

## 6.6 Modul Display\_Driver

Má na starosti vypisovanie nameraných hodnôt na štyri krát 7 segmentový display. Zápis prebieha samostatne na každý z nich. Najprv je vykreslená hodnota na prvom, na druhom, treťom a štvrtom. Tento cyklus sa neustále opakuje. Ukazateľ sa inkrementuje.

```

-- inkrementacia "ukazatela" - vyber vzdy len jednej z ctyroch segmentoviek

IF khertz_en = '1' THEN
    cd <= cd + 1;
END IF;

-----

-- podla "ukazatela" cd je aktivovana prislusna pozicia (aktivna v 0)

CASE cd IS -- curr je soucasne zobrazena cifra, digit je jej pozicia
    WHEN "00" => curr <= bcdint( 3 DOWNT0 0); digit <= "1110"; dp <= dp0;
    WHEN "01" => curr <= bcdint( 7 DOWNT0 4); digit <= "1101"; dp <= dp1;
    WHEN "10" => curr <= bcdint(11 DOWNT0 8); digit <= "1011"; dp <= dp2;
    WHEN OTHERS => curr <= bcdint(15 DOWNT0 12); digit <= "0111"; dp <= dp3;
END CASE ;

-- nastavenie prislusneho znaku na segmentovke podla BCD kodu na vstupe

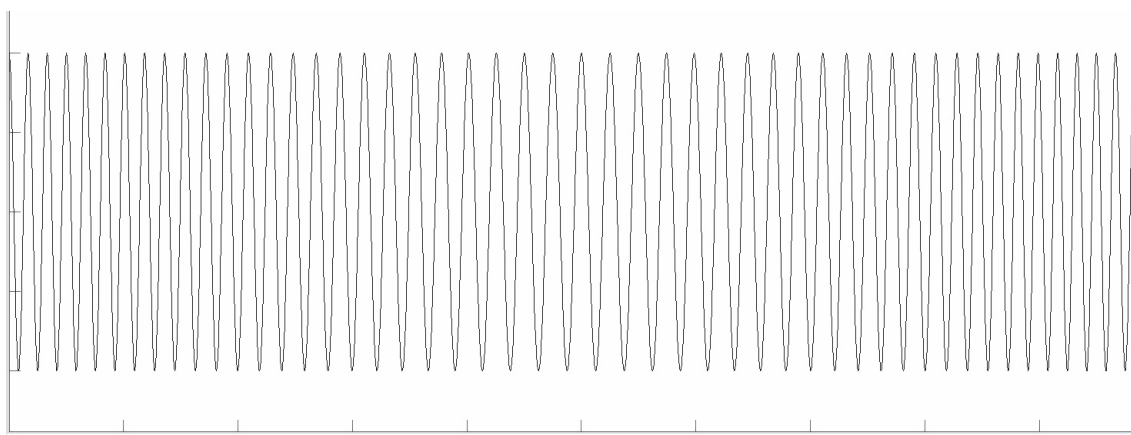
CASE curr IS
    WHEN "0000" => seg <= "00000001" & dp; -- 0
    WHEN "0001" => seg <= "1001111" & dp; -- 1
    WHEN "0010" => seg <= "0010010" & dp; -- 2
    WHEN "0011" => seg <= "0000110" & dp; -- 3
    WHEN "0100" => seg <= "1001100" & dp; -- 4
    WHEN "0101" => seg <= "0100100" & dp; -- 5
    WHEN "0110" => seg <= "0100000" & dp; -- 6
    WHEN "0111" => seg <= "0001111" & dp; -- 7
    WHEN "1000" => seg <= "0000000" & dp; -- 8
    WHEN "1001" => seg <= "0000100" & dp; -- 9
    WHEN "1010" => seg <= "0001000" & dp; -- A
    WHEN "1011" => seg <= "1100000" & dp; -- B
    WHEN "1100" => seg <= "0110001" & dp; -- C
    WHEN "1101" => seg <= "1000010" & dp; -- D
    WHEN "1110" => seg <= "0110000" & dp; -- E
    WHEN OTHERS => seg <= "0111000" & dp; -- F
END CASE;

```

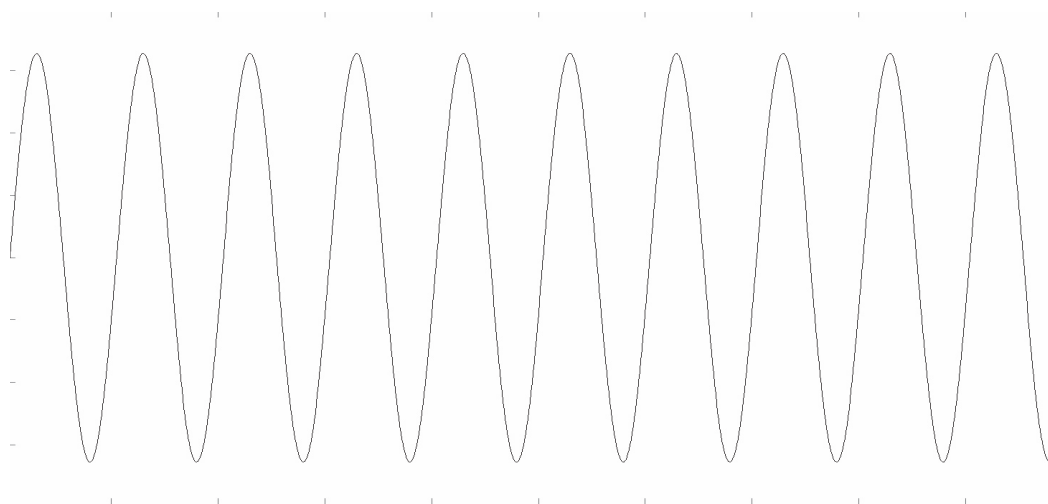
## 7 ZÁKLADNÉ FUNKČNÉ OVERENIE

Základné funkčné overenie bolo prevedené v simulátore, pre bloky **Modulace** a **Demodulator**. Pre simuláciu bol zvolený nosný kmitočet signálu 3MHz, veľkosť modulačného kmitočtu a kmitočtového zdvihu 60kHz. Dôvodom vysokého modulačného kmitočtu je lepšia vizuálna rozlíšiteľnosť.

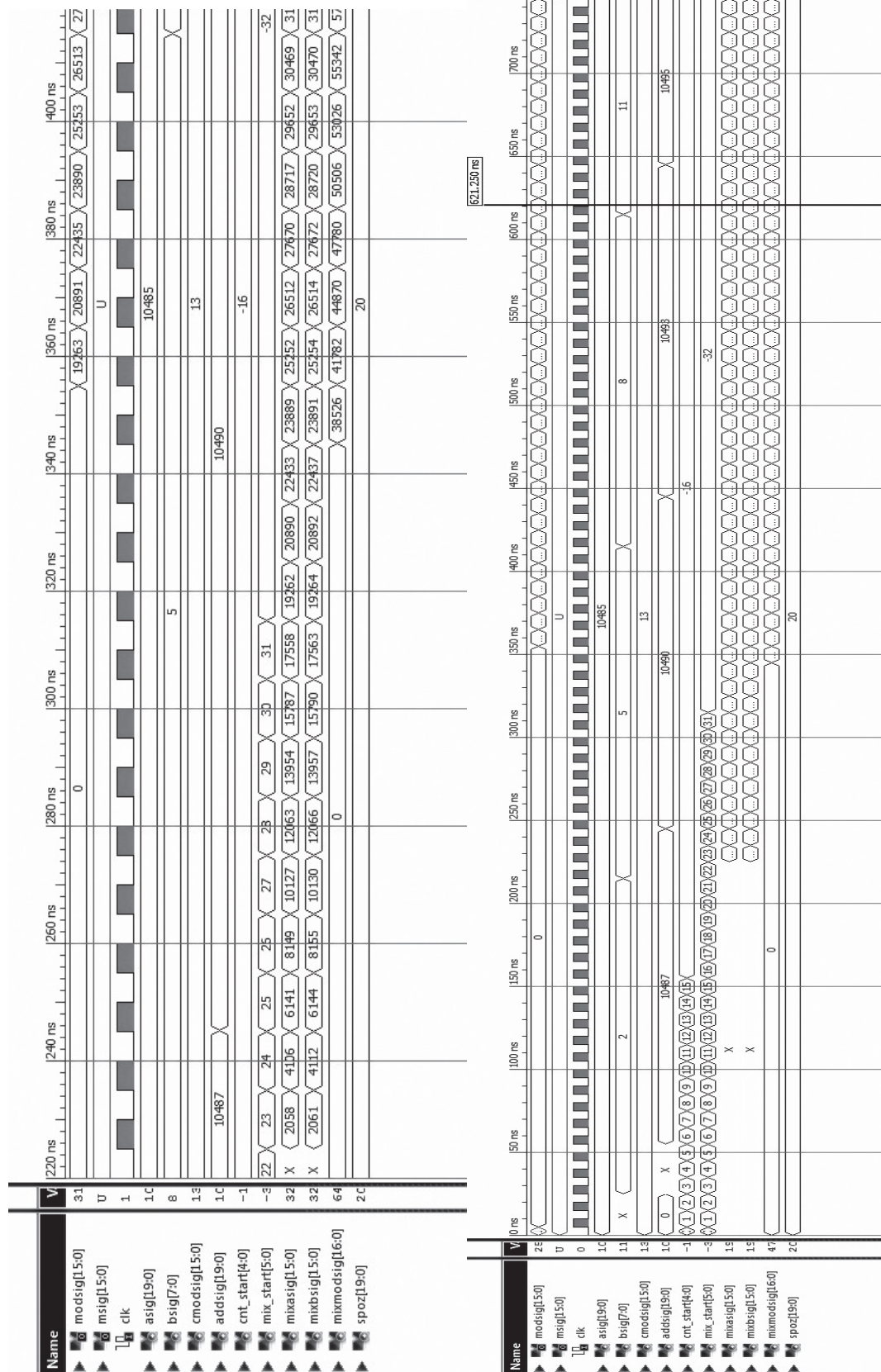
Na obrázkoch 7.3 a 7.4 sú ukázané priebehy signálov v jednotlivých blokoch. Na výstupoch blokov boli namerané priebehy signálov. Hodnoty jednotlivých vzorkov boli ukladané do textového súboru a následne importované do programu Matlab, kde bolo možné zostrojiť priebehy signálov. Z bloku **Modulace** bol vyčítaný kmitočtovo modulovaný signál a z bloku **Demodulator** signál demodulovaný.



Obr. 7.1.: Časový priebeh kmitočtovo modulovaného signálu

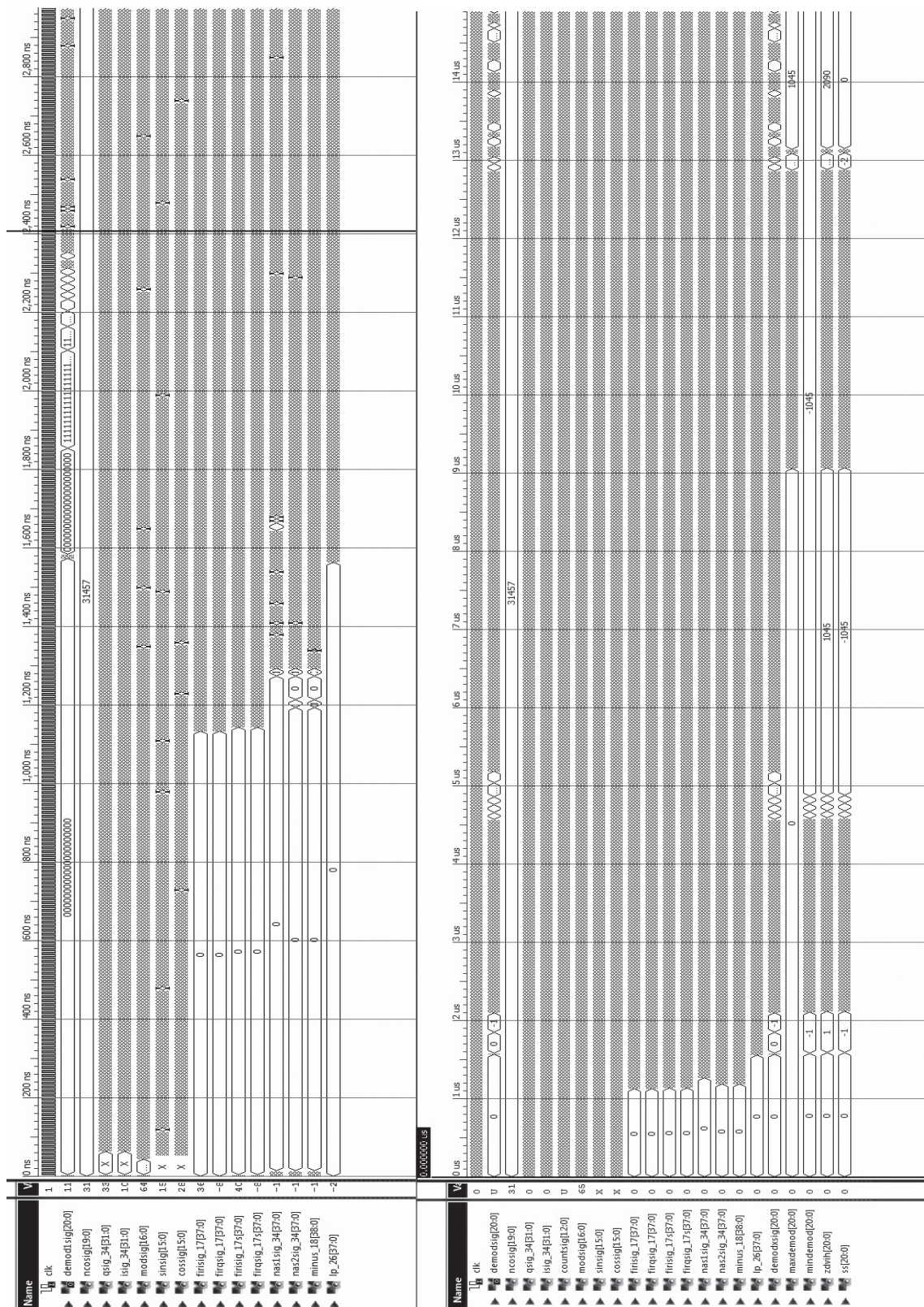


Obr. 7.2.: Časový priebeh kmitočtovo demodulovaného signálu



Obr. 7.3.: Časový priebeh signálov v modulátore





Obr. 7.4 Časový priebeh signálov v demodulátore

## 8 ZÁVER

V práci je navrhnutý a podrobne analyzovaný simulátor funkcie modulačnej a demodulačnej časti kontinuálne pracujúceho FM-CW radaru (bez mikrovlnnej vstupnej časti) určený pre laboratórne vyučovanie. Vychádza zo základnej koncepcie radarov pracujúcich s kmitočtovo modulovanou vlnou a vyhodnocovaním kmitočtového zdvihu.

Diplomová práca obsahuje štúdium základných princípov a funkcií kontinuálne pracujúcich diaľkomerov. V texte je uvedený rozbor vzniku možných chýb a odhad najväčšej relatívnej chyby presnosti merania reálnych FM-CW radarov. Po zvolení metódy realizácie pomocou FPGA bolo navrhnuté detailné blokové schéma simulátoru funkcie FM-CW diaľkomeru. V zhode so zadáním bola realizovaná počítačová simulácia funkcie generátora kmitočtovo modulovaného signálu, demodulátoru a detailný rozbor návrhu všetkých blokov laboratórneho prípravku. Výsledky simulácií potvrdili závery výpočtov uskutočnených v rámci analýzy funkcie FM-CW diaľkomeru.

Hlavným prínosom práce je použitie programovateľného logického obvodu, čo umožňuje okrem merania simulovanej vzdialenosti aj možnosť simulácie a vyhodnocovanie rýchlosti. Výhodou zvolenej metódy realizácie je do budúcnosti pomerne jednoduchá možnosť rozšírenia prípravku o ďalšie periférie bez zásahu do hardwarovej časti. Konštrukčné podklady prípravku neboli potrebné, pretože po porade s vedúcim DP bolo rozhodnuté, že pre prípadnú realizáciu laboratórneho simulátoru diaľkomeru (nebolo zadáním požadované) bude použitá vývojová doska XILING Spartan - 3. (viz obr. 5.2 a 5.3), pomocou ktorej sú všetky funkčné bloky prípravku a odpovedajúce funkcie modulátoru a demodulátoru realizované. Tá poskytuje taktiež dostatočný počet vstupných a výstupných pinov pre prípadné ďalšie rozširovanie prípravku a jeho funkcií.

# LITERATÚRA

- [1] ŘÍČNÝ, V. Maximum available accuracy of FM-CW radars. Radioengineering. 2009, vol. 18, no. 4, p. 350-353.
- [2] ŘÍČNÝ, V. *Přesná výškoměrná soustava*. Kandidátská disertační práce. Brno: Fakulta elektrotechnická VUT v Brně, 1971.
- [3] JUŘICA, L. *Automatické měření odstupu vozidel*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [4] KOLOUCH, J.: *Programovatelné logické obvody – přednášky*. [Skriptum FEKT VUT v Brně.] Brno, 2005
- [5] KUBÍČEK, M.; KOLOUCH, J.: *Programovatelné logické obvody - jazyk VHDL* . Elektronický text na serveru UREL FEKT VUT v Brně
- [6] MARŠÁLEK, R.: *Softwarové rádio – přednášky*. Elektronický text na serveru UREL FEKT VUT v Brně
- [7] Spartan-3 Starter Kit Board User Guide [online]. 2004 – [cit. 28. duben 2004]. Dostupné na www: [http:// www.xilinx.com](http://www.xilinx.com)